

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Tlumení přímočarých pneumomotorů v koncových polohách

Cushioning at the End of Pneumatic Cylinder Stroke

Student: Bc. Jan Beněk

Vedoucí diplomové práce: Ing. Lukáš Dvořák, Ph.D.

Ostrava 2011

Okopírované zadání

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на ве́домии, же́ Высшая школа́ ба́ньская – Техни́ческая универси́тета Остра́ва (да́ле же́ VŠB-TUO) ма́а пра́во нево́двече́нно к сво́ей вну́трянне́й потре́бе бакала́рскую пра́цу ужи́ть (§35 одст. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было́ сже́днано́, же́ с VŠB-TUO, в пра́вдае́ за́йма з же́й стра́ны, уза́вру́ лицен́ци́ с мо́ува с опра́внени́м ужи́ть де́ло в ро́зсahu §12 одст. 4 ау́торско́го за́кона.
- было́ сже́днано́, же́ ужи́ть сво́е де́ло – бакала́рскую пра́цу же́бо по́ска́зну́ть лицен́ци к же́йму́ ву́зду́жи́ мо́гу же́ се со́ула́сем VŠB-TUO, же́ра́ же́ опра́внє́на в та́ковє́м пра́вдае́ оде́ мне́ по́зато́ват пра́мерє́ны́ пра́спє́вє́к на у́граду́ на́кладо́в, же́ре́ бы́лы VŠB-TUO на ву́зду́жє́ни́ де́ла ву́нала́же́ны (а́ж до же́йих́ са́куте́чнє́ ву́ше).
- беру на ве́домии, же́ оде́взда́ни́м сво́е пра́це со́ула́сам се́ зу́вє́жє́нє́ни́м сво́е пра́це по́dle за́кона́ ч. 111/1998 Sb., о́ ву́со́кых́ шко́лах́ а́ о зу́мє́нє́ а́ до́плнє́ни́ да́лше́йх́ за́коно́в (за́кон о́ ву́со́кых́ шко́лах́), ве́ зу́нє́ни́ по́здє́жше́йх́ пра́дпису́, же́з о́гле́ду на́ ву́сле́де́к же́йи́ о́бха́жо́бы.

V Ostravě :

.....

Hájová 17

Mokré Lazce

747-62

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

BENĚK, J. Tlumení přímočarých pneumomotorů v koncových polohách. Ostrava: katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011, 56s. Diplomová práce, vedoucí Dvořák, L.

Diplomová práce se zabývá popisem problematiky tlumení dojezdu pístu přímočarého pneumomotoru do koncové polohy včetně výpočtových vztahů. Přehledem možných způsobů tlumení s popisem funkce a jejich výhod a nevýhod. Sestavením matematického modelu zvoleného druhu tlumení a provedenou simulací. Návrhem experimentálního zařízení včetně vhodných snímačů a metodikou měření tlumení. Experimentálním ověřením zvoleného druhu tlumení a porovnáním výsledků měření s výsledky simulace.

ANNOTATION OF THESIS

BENĚK, J. Cushioning at the End of Pneumatic Cylinder Stroke. Ostrava: the department of hydromechanics and hydraulic equipment, the Faculty of mechanical engineering, VŠB-Technical university of Ostrava, 2011, 56p. The thesis, the headman Dvořák, L.

The thesis deals with description of the problems of cushioning of the piston of the Pneumatic Cylinder Stroke to its end position including the calculation relationships. Overview of possible methods of cushioning, description of their function, advantages and disadvantages. Forming of a mathematical model for the selected kind of cushioning, and done a simulation Designing of an experimental device with the inclusion of proper sensors and the cushioning measurement methodics. Experimentaly testing of the selected kind of cushioning and a comparsion between the results of the measurement and the results of the simulation.

OBSAH

1. Úvod	4
1.1 Diplomová práce se zabývá.....	4
2. Tlumení dojezdu pístu přímočarého pneumomotoru do koncové polohy	5
2.1 Kinematická energie - vnitřní tlumení.....	5
2.2 Kinematická energie - vnější tlumení.....	7
2.2.1 Různé způsoby tlumení kinetické energie.....	7
2.2.2 Diagram reakční síly v závislosti na dráze tlumení.....	8
2.3 Výpočet tlumení dojezdu pístu přímočarého pneumomotoru do koncové polohy	9
2.3.1 Výpočet vnitřního tlumení	9
2.3.2 Výpočet vnějšího tlumení dojezdu pístu přímočarého pneumomotoru do koncové polohy	13
3. Přehled možných druhů tlumení pístu přímočarých pneumomotorů do koncové polohy	18
3.1 Pružné dorazy bez kovové dosedací plochy.....	18
3.2 Pružné dorazy s kovovou dosedací plochou	19
3.3 Pneumatické samočinně nastavitelné tlumení.....	20
3.3.1 Charakteristika tlumení.....	23
3.4 Pneumatické nastavitelné tlumení	24
3.4.1 Charakteristika tlumení.....	26
3.5 Tlumící podložka	27
3.6 Damp & Seal.....	28
3.7 Externí tlumiče	30
3.7.1 Hydraulické tlumiče nárazu.....	30
3.7.2 Pneumatické tlumiče nárazu.....	31
3.8 Možná náhrada vestavného tlumení tlumením vnějším	32
4. Praktická část diplomové práce	33
4.1 Návrh experimentálního zařízení	33
4.2 Postup měření.....	35
4.2.1 Použité prvky :.....	36
4.3 Vyhodnocení měření	39
5. Simulace tlumení dojezdu pístu přímočarého pneumomotoru do koncové polohy s praktickým měření	42
5.1 Tvorba zjednodušeného matematického modelu pneumomotoru	42
5.2 Vyhodnocení simulace	44
5.2.1 Porovnání tlumeného a netlumeného dojezdu pístu do koncové polohy pomocí simulace	45

5.2.2 Porovnání simulace s měřením	47
5.2.3 Tlumení s drážkou zužující se po celé své délce.....	49
6. Závěr.....	52
7. Seznam použité literatury	54
8. Přílohy	56

Použité veličiny a jednotky :

Značka :	Název :	Rozměr :
A, A_1, A_2, A_3	plocha	[m ²]
a	délka tlumení	[m]
b	kritický poměr tlaků	[1]
C	zvuková vodivost	[1]
D, d, d_0, d_1	průměr	[m]
E	absorbovaná energie	[J]
E_1, E_k, W_0, W_1, W_k	kinetická energie	[J]
E_2	práce pohonu	[J]
F, F_Z	zátěžová síla	[N]
f	součinitel tření	[1]
	průřez	[m ²]
$F_{(p)}$	tlakově závislá síla	[N]
F_2	tlumící síla na pístnici tlumiče	[N]
F_a	setrvačná síla	[N]
F_{fr}	třecí síla	[N]
g	tíhové zrychlení	[m · s ⁻²]
H, h	zdvih	[m]
h	délka válce tlumiče	[m]
h_D	dráha tlumení	[m]
i	počet kanálků	[1]
K_1	součinitel tlumení	[1]
K_2	kritérium zmenšení rychlosti	[1]
K_3	kritérium sil	[1]
K_4	kritérium zmenšení setrvačných sil	[1]
L, l	délka	[m]
L_1	práce	[J]

m	hmotnost	[kg]
m_e	efektivní hmota	[kg]
m_{RED}	redukována hmotnost	[kg]
m_v	váhové množství vzduchu ve válci	[kg]
n	exponent polytropy	[1]
P	síla	[J]
$p_{atm}, p_0, p_1, p_2,$ $p_{2max}, p_e, p_s, \Delta p_{Z2}$	tlak	[Pa]
$Q_e, Q_m,$	hmotnostní průtok	[kg · s ⁻¹]
R	plynová konstanta	[J · K ⁻¹ · mol ⁻¹]
R_0	tření od pasivních odporů	[1]
S, S_e, S_s	plocha	[m ²]
S_T	dráha tlumení	[m]
$T_0, T_1, T_e, T_{max}, T_s$	termodynamická teplota	[K]
v, v_0, v_1, v_2, v_p	rychlost	[m · s ⁻¹]
$V_{2max}, V_e, V_K, V_M, V_s$	objem	[m ³]
W_0	energie na překonání pasivních odporů	[J]
W_1, W_2	tlumící energie	[J]
W_C	celková energie	[J]
W_p	potenciální energie od hmotnosti	[J]
W_{raz}	rázová energie	[J]
W_{t1}, W_{t2}	tlaková energie	[J]
$W_{tř}$	tření podél dráhy tlumení	[N]
W_V	energie stlačeného vzduchu v tlumícím prostoru	[J]
α	úhel	[1° = ($\frac{\pi}{180}$) rad]
ε	poměr tlaků	[1]
ε_{max}	mezný poměr	[1]
μ	součinitel průtoku	[1]

π	Ludolfovo číslo ($\pi = 3,14159$)	[1]
ω	úhlová rychlost	[$rad \cdot s^{-1}$]
ρ	hustota	[$kg \cdot m^{-3}$]
ψ	koeficient rychlosti průtoku vzduchu	[1]

1. Úvod

Dojezd přímočarých pneumomotorů (hlavně při vyšších rychlostech, nebo při hmotném zatížení pístnice), do koncové polohy musíme tlumit, aby nedocházelo k mechanickému poškození části, nebo celého mechanismu při nárazu pístu do víka pneumomotoru při dosažení koncové polohy zdvihu. Způsobů jak utlumit kinetickou energii pneumomotoru je mnoho. Hlavní rozdělení tlumení kinetické energie je na vnitřní a vnější. Tato tlumení se poté dále dělí na dílčí způsoby. Podrobněji si o těchto způsobech tlumení kinetické energie řekneme v dalších částech diplomové práce.

1.1 Diplomová práce se zabývá

1. Problematikou tlumení dojezdu pístu přímočarého pneumomotoru do koncové polohy včetně výpočtových vztahů.
2. Přehledem možných způsobů tlumení s popisem funkce a jejich výhod a nevýhod.
3. Návrhem experimentálního zařízení včetně vhodných snímačů a metodikou měření tlumení.
4. Sestavením matematického modelu zvoleného druhu tlumení (samočinně nastavitelné tlumení) a jeho simulací.
5. Experimentálním ověřením zvoleného druhu tlumení a porovnáním výsledků se simulací.

2. Tlumení dojezdu pístu přímočarého pneumomotoru do koncové polohy

2.1 Kinematická energie - vnitřní tlumení

Kinematická energie je jeden z druhů mechanické energie, kterou má pohybující se těleso (píst). Aby píst pneumomotoru při dojezdu do koncové polohy nenarazil prudce do víka (zejména, když se pohybuje plnou rychlostí, nebo je-li na konci pístnice hmotnost), je nutno dojezd tlumit. Vznikající setrvačné síly mají tedy vliv na životnost pneumomotoru.

Kinetická energie tělesa s přímočarým pohybem se vypočte podle vztahu 1.

$$E_K = \frac{m}{2} \cdot v^2 \quad (1)$$

E_K - kinetická energie pohybujícího se tělesa [$J = N \cdot m$]

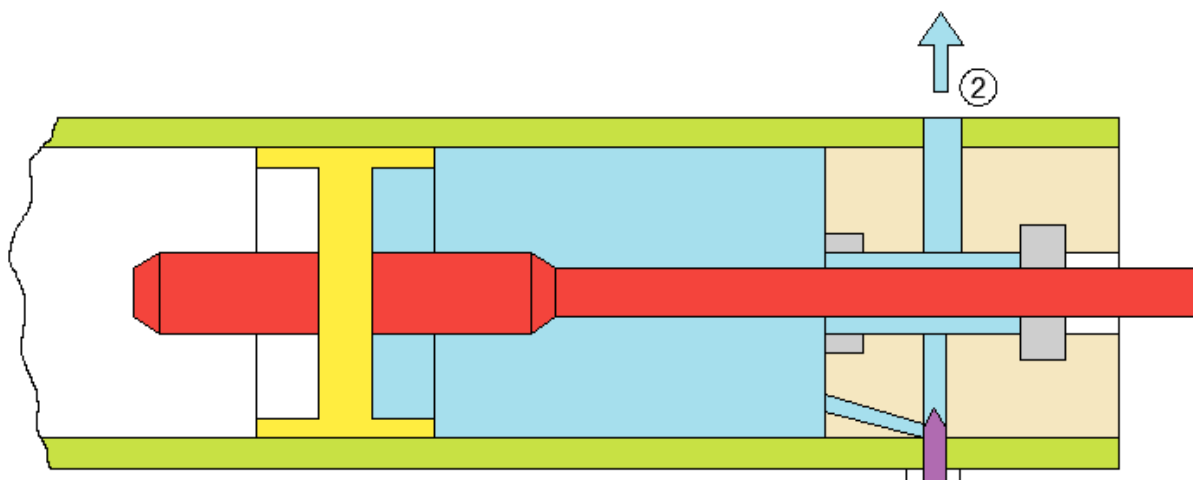
m - hmota pohybujícího se tělesa [kg]

v - rychlost pohybujícího se tělesa v okamžiku nárazu [$\frac{m}{s}$]

Základní tlumení dojezdu pístu přímočarých pneumomotorů do koncové polohy si názorně popíšeme na obrázku (Obrázek 1, Obrázek 2).

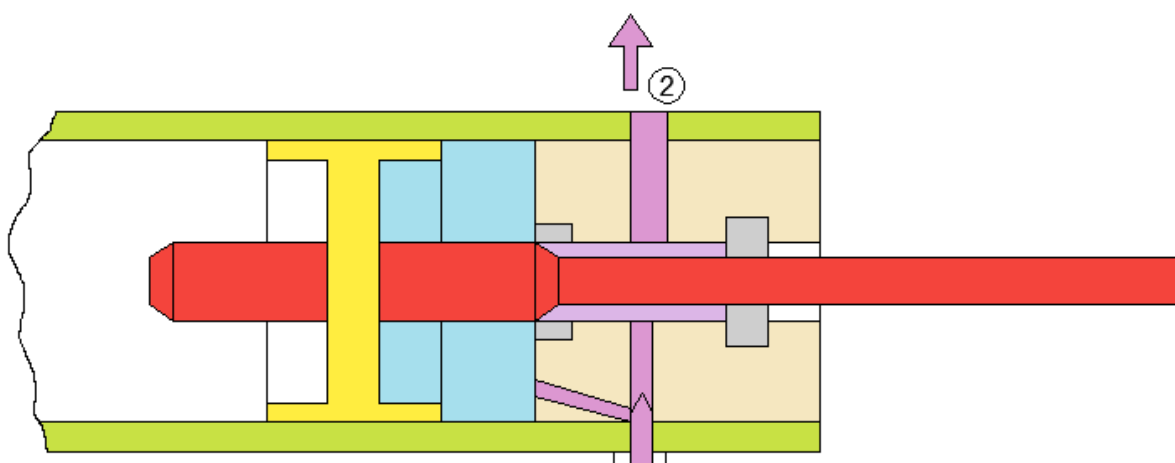
Toto tlumení je vyřešeno pomocí tvaru pístu a pístnice. Na pístu je rozšíření (tlumící kolík), který při dojezdu do koncové polohy zamezí tlakovému vzduchu pokračovat přímou cestou do výstupu. Tlakový vzduch je tedy nucen odcházet přes výtláčný kanálek (škrtící ventil), kterým můžeme regulovat odpor proudění, tedy tlumení.

Pokud píst dojíždí do koncové polohy, veškerý tlakový vzduch odchází výstupem 2 do odfuku (cestou menšího odporu). Kanálkem tlumení odchází tlakový vzduch jen minimálně.



Obrázek 1 : princip vnitřního tlumení dojezdu pístu do koncové polohy (netlumený pohyb)

Jakmile píst dojede do koncové polohy a rozšíření (tlumicí kolík) se zasune do těsnění, poté veškerý zbývající tlakový vzduch z prostoru mezi pístem a víkem pneumomotoru odchází přes kanálek tlumení výstupem 2 do odfuku.



Obrázek 2 : princip vnitřního tlumení dojezdu pístu do koncové polohy (tlumený pohyb)

2.2 Kinematická energie - vnější tlumení

Jak je uvedeno v [5] pokud se pohybuje mechanismus pneumomotoru na konci zdvihu vyšší rychlostí než 0,5 m/s hrozí nebezpečí poškození mechanismu nárazem na pevný doraz působením kinetické energie. Proto by se měly mechanismy pneumomotoru při rychlosti 0,5 m/s a vyšší vždy utlumit použitím externích dorazů s tlumiči energie. Jakou maximální kinetickou energii je schopen daný doraz utlumit zjistíme z příslušného katalogu. Kinetická energie tělesa s přímočarým pohybem se vypočte podle vztahu 1.

2.2.1 Různé způsoby tlumení kinetické energie

1. Tlumení pružnými prvky

K tlumení kinetické energie se používají pružiny a nárazníky z pružných materiálů (guma, plasty a pod.). Kinetická energie, kterou pružný prvek přijme je akumulována a při opačném pohybu opět předána tělesu. Tlumení s pružnými prvky je vhodné pro zařízení s menšími nároky na průběh tlumení kinetické energie.

2. Tlumení kapalinou

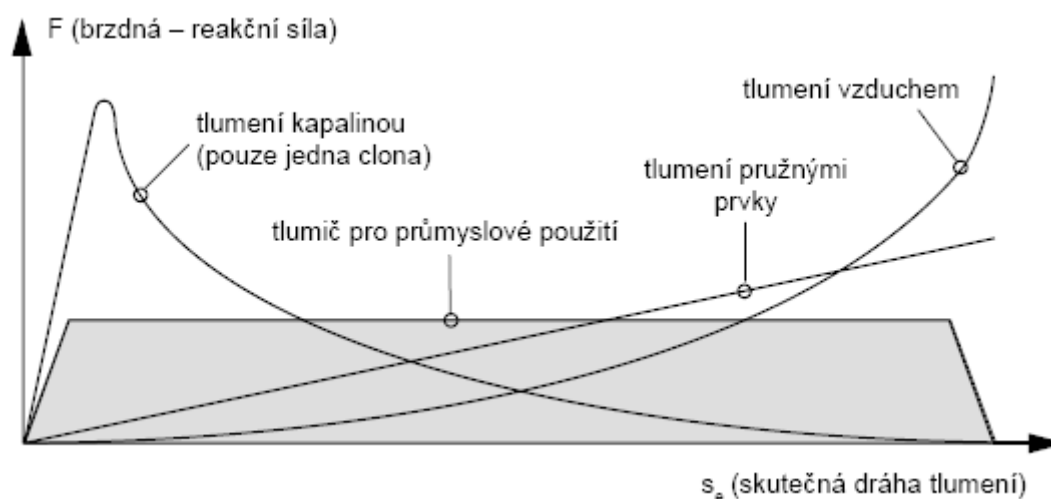
Na počátku dráhy tlumiče proudí olej kanálem, jehož průřez lze ve většině případů regulovat. Náhlá změna průřezu, kterým protéká olej, zvýší tlak oleje. Na dráze několika milimetrů se kinetická energie absorbuje, což se projeví, kromě zvýšení tlaku, také zvýšením teploty oleje. Teplo se odvádí povrchem tlumiče do okolního prostředí. Při opačném pohybu vysune tlak oleje píst tlumiče do výchozí polohy.

3. Tlumení vzduchem

Kinetická energie se tlumí až před koncem zdvihu pístu válce, protože vzduch je stlačitelný. Vzduch je stlačován v malém prostoru na velmi vysoký tlak a může akumulovanou energií působit proti pohybu pístu, který rozkmitá. Teplo, které vznikne díky zvýšení tlaku vzduchu se odvádí materiálem vík válců do okolí.

2.2.2 Diagram reakční síly v závislosti na dráze tlumení

Na obrázku (Obrázek 3) je porovnána charakteristika průběhu funkce tlumiče pro průmyslové použití s ostatními způsoby tlumení kinetické energie, jak je patrné, průmyslové tlumiče vyvinou podstatně menší sílu pro zastavení tělesa než běžné tlumicí prvky.



Obrázek 3 : diagram závislosti síly na dráze tlumení pro různé způsoby tlumení kinetické energie [8]

Správně zvolené tlumiče pro průmyslové použití absorbují danou kinetickou energii na nejkratší možné dráze s minimální brzdou silou. Rovněž vykonaná práce průmyslových tlumičů znázorněná v diagramu tmavou plochou, je větší než u všech ostatních způsobů tlumení.

2.3 Výpočet tlumení dojezdu pístu přímočarého pneumomotoru do koncové polohy

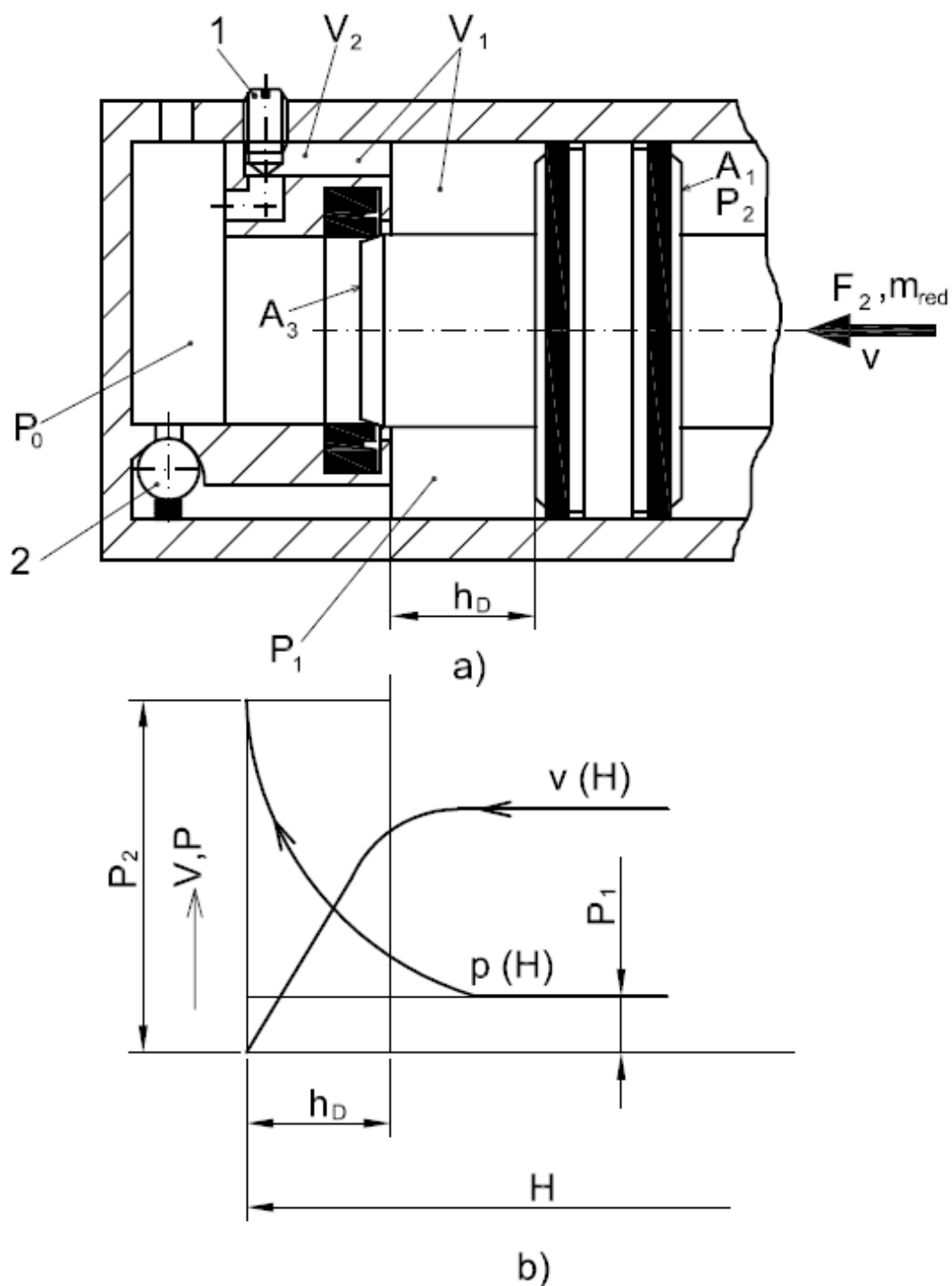
V této kapitole si ukážeme základní výpočty tlumení dojezdu pístu přímočarého pneumomotoru do koncové polohy jak vnitřního tak vnějšího.

2.3.1 Výpočet vnitřního tlumení

Jak je uvedeno v [9] toto tlumení je vyřešeno pomocí tvaru pístu a pístnice (Obrázek 4a). Na pístu je rozšíření (tlumicí kolík o ploše A_3), který se zasouvá do otvoru ve víku. Z uzavřeného objemu V_1 mezi pístem a válcem může vzduch unikat pouze přes výtláčný kanálek I (škrťací ventil), kterým můžeme regulovat odpor proudění, tedy intenzitu brzdění. Při vysouvání pístu je prostor před pístem plněn stlačeným vzduchem přes jednosměrný ventil 2. Jakmile úplně uzavřeme škrťací ventil, tlumicí vzduch v prostoru tlumení (objem $V_1 + V_2$) dosahuje velmi vysokých hodnot tlaku což můžeme vidět na obrázku. (Obrázek 4b).

$$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n \quad (2)$$

Tento tlak, který je vyšší než tlak v potrubí, působí příznivě při zpětném pohybu pístu, neboť urychluje píst ještě vpřed vstupem stlačeného vzduchu z potrubí. Při úplném otevření škrťacího ventilu je pohyb pístu tlumen pouze pasivními odpory a tlumicí účinek je minimální při tlaku $p_1 = p_0$.



Obrázek 4 : schéma k výpočtu tlumení

a - pracovní prostory tlumení, b- průběh tlaku (bez přihlédnutí k jeho rozptylu v přiváděném potrubním systému) a rychlosti při tlumení

Při pohybu pístu před jeho úvratí je třeba utlumit:

a) kinetickou energii pohybované hmoty při vstupu do dráhy tlumení h_d

$$W_k = \frac{1}{2} \cdot m_{red} \cdot v^2 \quad (3)$$

b) tlakovou energii podél dráhy tlumení

$$W_{t1} = A_1 \cdot p_2 \cdot h_d \quad (4)$$

c) potenciální energii od hmotnosti podél dráhy tlumení

$$W_p = \pm m_{red} \cdot g \cdot h_d \cdot \sin \alpha \quad (5)$$

kde znaménko + určuje při sklonu motoru jeho pohyb směrem po sklonu a znaménko - pohyb proti sklonu.

Celková tlumící energie (aktivní) bude

$$W_1 = W_k + W_{t1} \pm W_p \quad (6)$$

Tuto tlumenou energii zmenšuje:

a) energie na překonání pasivních odporů (třecích odporů těsnění) podél dráhy tlumení h_d

$$W_0 = R_0 \cdot h_d = a \cdot F_z \cdot h_d = a \cdot A_1 \cdot p_2 \cdot h_d \quad (7)$$

b) energie rázu na konci dráhy tlumení. Tato energie však musí být velmi malá, neboť z hlediska pevnosti spojení víka s válcem se nárazová rychlost připouští max. $0,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Proto ji lze zanedbat.

c) tlaková energie na tlumicí straně pístu, daná tlakem na výfukové straně p_0 a plochou tlumicího nástavce A_3 (při tlumení na straně pístnice zmenšená o plochu pístnice).

d) energie stlačeného vzduchu v tlumicím prostoru

$$W_v = \frac{p_1 \cdot V_1}{n-1} \cdot \left[\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} - 1 \right] = \frac{p_1 \cdot V_1}{n-1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{n-1/n} - 1 \right] \quad (8)$$

kde $n=1,3$ je exponent polytropy

Objem tlumicího prostoru na začátku tlumení $V_1 = V_M + V_k$

$$\text{Objem prostoru mezikruží } V_M = \frac{\pi \cdot (D^2 - d_1^2)}{4} \cdot h_d \quad (9)$$

$$\text{Objem v kanálcích } V_k = i \cdot \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot l \quad (10)$$

Objem tlumicího prostoru na konci tlumení $V_2 = V_k$

Tření podél dráhy tlumení

$$W_{tr} = f \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot h_d \quad (11)$$

Tlaková energie od tlaku na výfukové straně pístu

$$W_{t2} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_1^2 - d^2) \cdot \Delta p_{z2} \cdot h_d \quad (12)$$

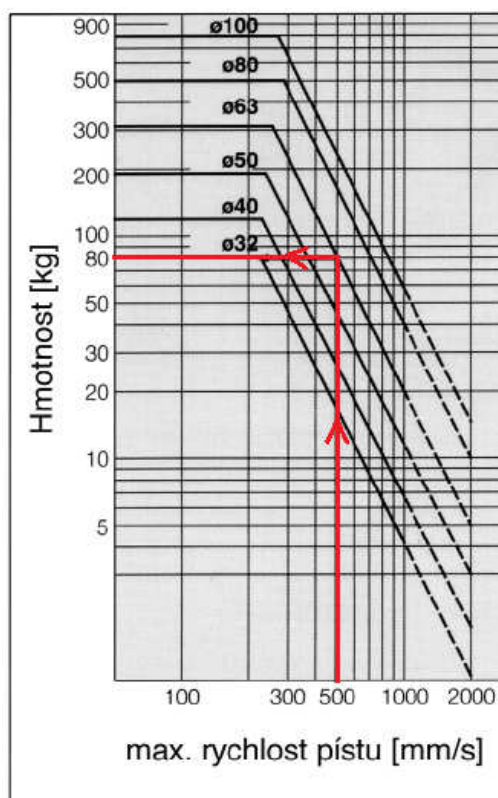
Tlumicí energie

$$W_2 = W_0 + W_v + W_{tr} + W_{t2} \quad (13)$$

Rázová energie

$$W_{raz} = 0$$

K dosažení dokonalého utlumení musí platit $W_1 \leq W_2$. Určíme-li konstrukci přímočarého motoru dráhu podél celkové délky zdvihu H z poměru $h_d/H=0,08$ až $0,12$, průměr tlumicího nástavce z poměru $\frac{d_1}{D} = 0,4$ až $0,6$ je patrné, že při jinak konstantních hodnotách m_{red}, v, A_1 a p_2 je intenzitu tlumení možno ovlivňovat velikostí tlaku p_1 v tlumicím prostoru. To se děje, jak již bylo uvedeno, škrticím ventilem. S ohledem na složité termodynamické procesy při škrcení, dají se optimální podmínky tlumení pohybu přímočarého motoru v koncových polohách nastavit pro daný případ jen experimentálně. Proto někteří výrobci přímočarých motorů uvádějí diagram (Obrázek 5), z něhož lze pro danou pístovou rychlost a průměr pístu stanovit maximální hmotnost k pístnici připojených redukovaných hmot. Například jak je vyznačeno na obrázku, kde pro válec průměru $D=63 \text{ mm}$, který se pohybuje rychlostí $v=500 \text{ mm/s}$, je hodnota maximální hmotnosti zatížení pístnice rovna $m=80 \text{ kg}$.



Obrázek 5 : Ukázka diagramu pro stanovení maximální tlumené hmotnosti [smc]

2.3.2 Výpočet vnějšího tlumení dojezdu pístu přímočarého pneumomotoru do koncové polohy

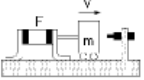
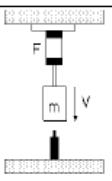
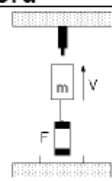
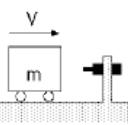
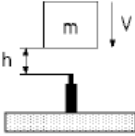
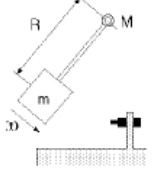
1. Průmyslové hydraulické tlumiče

Abychom správně vybrali tlumič, měli bychom mít určité znalosti kinetiky a kinematiky. Musíme správně určit hodnoty síly, hmotnosti a rychlosti pohybu tělesa, jehož pohybovou energii chceme pomocí tlumiče absorbovat.

Jak je uvedeno v [8] pro volbu tlumiče (v okamžiku styku pohybujícího se tělesa s tlumičem) jsou určující:

- hmotnost pohybujícího se tělesa
- rychlost v okamžiku nárazu tělesa na tlumič
- síly poháněcího mechanismu působící na pohybující se těleso
- počet pracovních cyklů tlumiče za jednotku času

Díky těmto údajům jsme schopni vypočítat vhodný tlumič pro 90 % případů použití. Podle způsobu působení energie tělesa na tlumič se použije příslušný vzorec pro jeho výpočet (Obrázek 6).

způsob zatížení	válec s břemenem	válec s břemenem dolů	válec s břemenem nahoru	náraz vodorovně	náraz svisle – volný pád	hmota na rameni s pohonem
						
vzorce pro výpočet	v	v	v	v	$\sqrt{2gh}$	$= \omega$
	E_1	$\frac{m \times v^2}{2}$	$\frac{m \times v^2}{2}$	$\frac{m \times v^2}{2}$	$m \times g \times h$	$\frac{I\omega^2}{2}$
	E_2	$F \times s$	$F \times s + m \times g \times s$	$F \times s - m \times g \times s$	–	$\frac{M}{R} \times s$
	E	$E_1 + E_2$	$E_1 + E_2$	$E_1 + E_2$	E_1	$E_1 + E_2$
	m_e	$\frac{2E}{v^2}$	$\frac{2E}{v^2}$	$\frac{2E}{v^2}$	m	$\frac{2E}{v^2}$

Obrázek 6 : přehled pro výpočet vnějšího tlumení [8]

V katalogových listech tlumičů je uvedena tlumičem absorbovaná energie (E) nebo efektivní hmota (m_e) včetně vypočtených příkladů pro běžné použití tlumičů v praxi.

2. Pneumatické tlumiče

Jak je uvedeno v [10] pro mnohostranné použití pneumatických tlumičů je možno stanovit kritéria jejich činností a vlastností, mezi něž bude patřit zejména kinetická energie nutná k ubrzdění působící síly a jejich směr, rychlosti pohybu v dané poloze a v daném čase.

U tlumičů lze hodnotit součinitel tlumení, který se stanoví z rozdílu kinetických energií při netlumeném W_0 a tlumeném W_1 pohybu k energii netlumeného pohybu, tedy

$$k_1 = \frac{W_0 - W_1}{W_0} = \frac{0,5 \cdot m \cdot v_0^2 - 0,5 \cdot m \cdot v_1^2}{0,5 \cdot m \cdot v_0^2} = \frac{v_0^2 - v_1^2}{v_0^2} \quad (14)$$

kde v_0 a v_1 jsou rychlosti, příslušející netlumenému a tlumenému pohybu hmoty m .

Tohoto obecného kritéria energií je možné také použít pro kritérium zmenšení rychlosti, kde rychlost pohybu v_1 může být časovou funkcí.

$$k_2 = \frac{v_0 - v_1(t)}{v_0} \quad (15)$$

Protože pneumatický tlumič je v podstatě přímočarý pneumomotor s tlakově závislou silou $F(p)$ působící proti setrvačné síle F_a , je možné použít srovnávací kriterium sil.

$$k_3 = \frac{F(p)}{F_a} \quad (16)$$

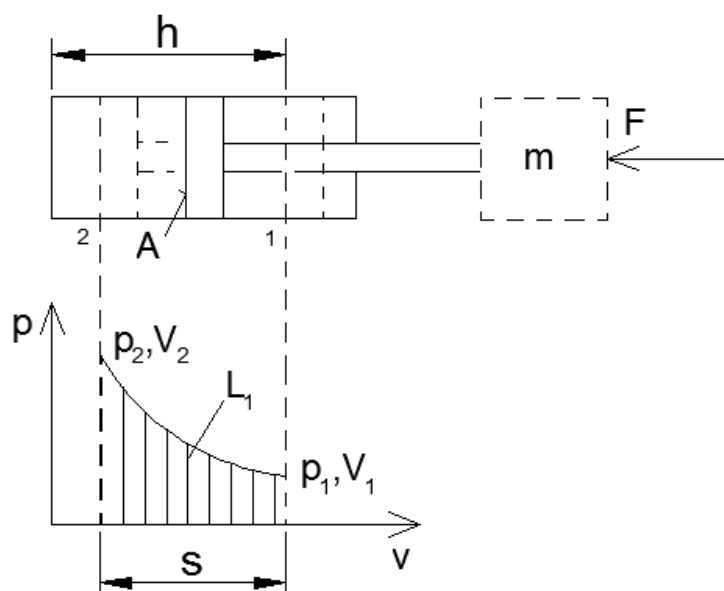
nebo kriterium zmenšení setrvačných sil

$$k_4 = \frac{F_a - F(p)}{F_a} \quad (17)$$

Z dále uvedeného přehledu použití tlumičů je patrné, že účinek tlumiče musí působit proti silám setrvačným a silám statickým, při pohybu přímočarém, kývavém, rotačním a také s gravitačním účinkem.

Výpočet pneumatického tlumiče

Cílem je získat optimální rozměry válce tlumiče s přihlédnutím k přípustnému maximálnímu tlaku a teplotě stlačeného vzduchu, tlumené a akumulované energie, počátečnímu objemu válce tlumiče, součinnosti tlumení a dráhy a času. Výpočet naznačíme pro konstrukční provedení tlumiče s uzavřeným objemem (Obrázek 7) jak je uvedeno v [10].



Obrázek 7 : Schéma k výpočtu tlumiče

Při stlačování vzduchu ve válci, tj. při tlumení kinetické energie a případně i statických sil, bude elementární práce $dL=p \cdot dV$ a celková práce při stlačování 1 kg vzduchu ve válci mezi polohami pístu 1-2 dána integrálem

$$L = \int_{v_1}^{v_2} p \cdot dV \quad (18)$$

Na počátku zdvihu pístu je rychlost v_1 na konci zdvihu v_2 a pak při tlumení bude platit rovnováha energie tlumení a práce pro váhové množství vzduchu ve válci m_v

$$W_C = L_1 = m_v \cdot L \quad (19)$$

Práce L_1 je závislá na procesu stlačování a pro obvyklý polytropický proces bude

$$L_1 = -\frac{1}{n-1} \cdot (p_1 \cdot V_1 - p_2 \cdot V_2) \quad (20)$$

Objemy V_1 a V_2 na počátku a konci stlačování, (Obrázek 7), jsou

$$V_1 = A \cdot h \quad a \quad V_2 = A \cdot (h - s).$$

Dosazením do rovnice (20) bude

$$L_1 = -\frac{A \cdot h \cdot p_1}{n-1} \cdot \left[1 - \frac{p_2 \cdot (h-s)}{p_1 \cdot h} \right] \quad (21)$$

Protože pro polytropickou kompresi platí $p_1 \cdot V_1^n = p_2 \cdot V_2^n$ můžeme psát

$$\frac{h-s}{h} = \frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{-\frac{1}{n}} = \varepsilon^{-\frac{1}{n}} \quad (22)$$

kde ε je poměr tlaku konečného p_2 k počátečnímu p_1 . Po dosazení do rovnice (21)

$$W_C = L_1 = -\frac{A \cdot h \cdot p_1}{n-1} \cdot \left(1 - \varepsilon^{\frac{n-1}{n}} \right) \quad (23)$$

Práce L_1 musí být v rovnováze s tlumenou energií W_1 buď jen od pohybujících se hmot m

$$W_1 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (24)$$

nebo s přidáním síly F , jejíž energie na dráze zdvihu s bude $W_2 = F \cdot s$.

Z podmínky polytropické komprese může být stanovena tlumicí síla na pístnici tlumiče na konci zdvihu

$$F_2 = p_2 \cdot A = p_1 \cdot A \cdot \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n = F_1 \cdot \left(\frac{s}{n-s} \right)^n \quad (25)$$

Z rovnice (22) stanovíme délku válce tlumiče

$$h = \frac{s}{1 - \frac{1}{\varepsilon n}} = \frac{s}{1 - \varepsilon n} \quad (26)$$

Poměr zdvihu tlumiče s k jeho délce válce *bývá* $h/s = 4$ až 5 u tlumičů bez vratné pružiny a $h/s = 2$ až $3,5$ u tlumičů s vratnou pružinou.

Dalším krokem výpočtu je určení přípustného maximálního tlaku v tlumiči, který podle termodynamických zákonů, bude vázán na maximální přípustnou teplotu vzduchu při kompresi, která by nepoškozovala těsnění pístu a nesnižovala účinnost mazání. Podle údajů výrobců je takovou mezní teplotou hodnota 160 až 180°C . Mezný poměr bude $\varepsilon_{max} = \frac{p_{2max}}{p_1}$,

odkud pro polytropický proces komprese

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (27)$$

bude

$$\varepsilon_{max} = \left(\frac{T_{2max}}{T_1}\right)^{\frac{n}{n-1}} \quad (28)$$

Pro reálnou polytropickou kompresi je možno volit $n=1,25$ až $1,33$. Pro $T_{2max}=273+160=430$ K a $T_1=273+20=293$ K bude

$$\varepsilon_{max} = \frac{p_{2max}}{p_1} = 4,8 \text{ až } 7 \quad (29)$$

S jistou bezpečností proti ohřívání tlumiče, zejména při větší frekvenci jeho činnosti, volí se $\varepsilon_{max} = 7$ až 10 . Se zvolenou hodnotou ε_{max} můžeme potom počítat ze vztahu

$$\varepsilon_{max} = \left(\frac{V_1}{V_{2max}}\right)^n \quad (30)$$

bud' počáteční V_1 nebo konečný V_{2max} objem pracovního prostoru tlumiče, nebo při zvolených hodnotách h a s vnitřní průměr válce tlumiče.

Výpočet pneumatického tlumiče s regulovaným vypouštěním komprimovaného vzduchu je podstatně složitější, neboť je potřebné stanovit závislost mezi tlakem a proměnným objemem vzduchu ve válci tlumiče, což vede ke složitým vztahům, z nichž parametry tlumiče se určují jen velmi přibližně.

3. Přehled možných druhů tlumení pístu přímočarých pneumomotorů do koncové polohy

3.1 Pružné dorazy bez kovové dosedací plochy

Válec je tlumen pružným dorazem (pryžový element např. kroužek) a zůstává opřen o tuto pryž. Energii pohlcují přímo pružné tlumicí kroužky, integrované v pístu. Je zde malá opakovatelná přesnost koncové polohy. Tlumicí kroužky jsou integrovány do pístu a poskytují vynikající vlastnost pohybu a výjimečně dlouhou životnost, jak je uvedeno v [4].



Obrázek 8 : tlumení pomocí pružných dorazů bez kovové dosedací plochy [4]

<u>Výhody:</u>	<u>Nevýhody:</u>	<u>Použití:</u>
-výkonné pružné dorazy -omezení hluku	-utlumí pouze poměrně nízkou energii -tlumení nelze nastavit	-malé zatížení -nízké rychlosti -malá energie nárazu

Tabulka 1 : vlastnosti tlumení pryžovými pružnými dorazy

3.2 Pružné dorazy s kovovou dosedací plochou

Válec je tlumen pružným dorazem , guma se zamáčkne a jezdec se opře o kovovou část dorazu. Najetí do koncové polohy je přesné. Je zde velká, opakovatelná přesnost koncové polohy jak je uvedeno v [5].



Obrázek 9 : pružný doraz



Obrázek 10 : tlumení pomocí pružných dorazů s kovovou dosedací plochou [5]

3.3 Pneumatické samočinně nastavitelné tlumení

Samočinně nastavitelné tlumení je novým druhem tlumení, který nevyžaduje ruční nastavení. Jak je uvedeno v [4], drážky v pístu tlumení umožňují odvětrat vzduch nezávisle na délce tlumení. Válec je vybaven speciálními tlumícími písty ve formě prodloužení hlavního pístu. Na rozdíl od *nastavitelného tlumení* (3.4), jsou tlumící písty navíc opatřeny drážkami. Tvar drážek určuje průběh tlumícího polštáře, který na konci zdvihu vzniká. Velmi důležité je pozvolné zužování drážek, které nám na konci tlumení vymezí jen velmi malý prostor, kterým může vzduch odcházet a tím lépe utlumí dojezd pístu. Výsledkem je, že není nutný seřizovací šroub. Nelze však použít, pokud válec pracuje na hranici schopnosti tlumit (velké zatížení, velmi vysoká nebo nízká rychlost). Samočinně nastavitelné tlumení nevyžaduje žádné nastavení. Zkracuje se tím čas pro instalaci a zjednodušuje montáž. Tlumení je vždy ideálně nastavené, dokonce i v případě změny zátěže nebo rychlosti. Vyřešeno je i případně nedbalé nastavení.



Obrázek 11 : samočinně nastavitelné tlumení [4]

Výhody:

- bez potřeby ručního nastavení
- automaticky se přizpůsobuje změnám zátěže a rychlosti
- pohlcuje více energie než tlumení s pružnými dorazy
- snížení hluku

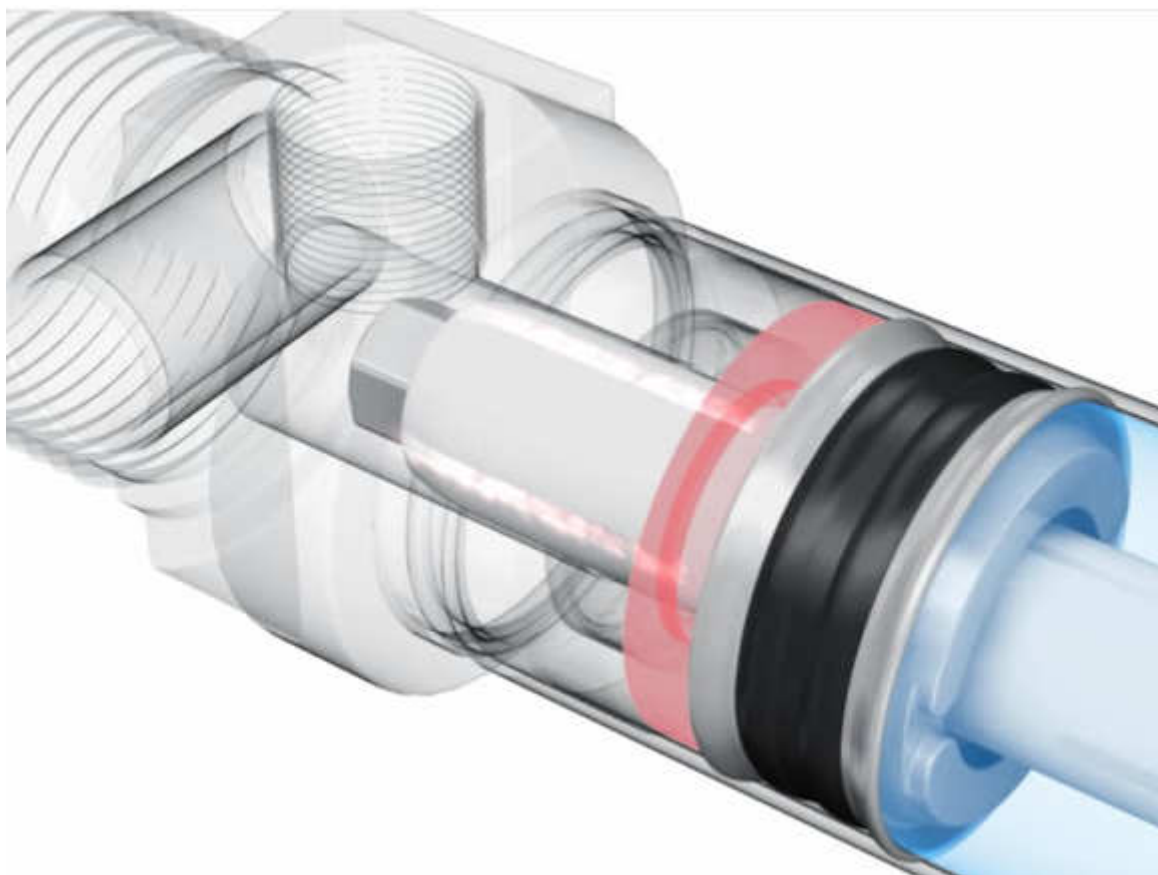
Použití:

- malé až střední zátěž
- nízké až střední rychlosti
- střední energie nárazu

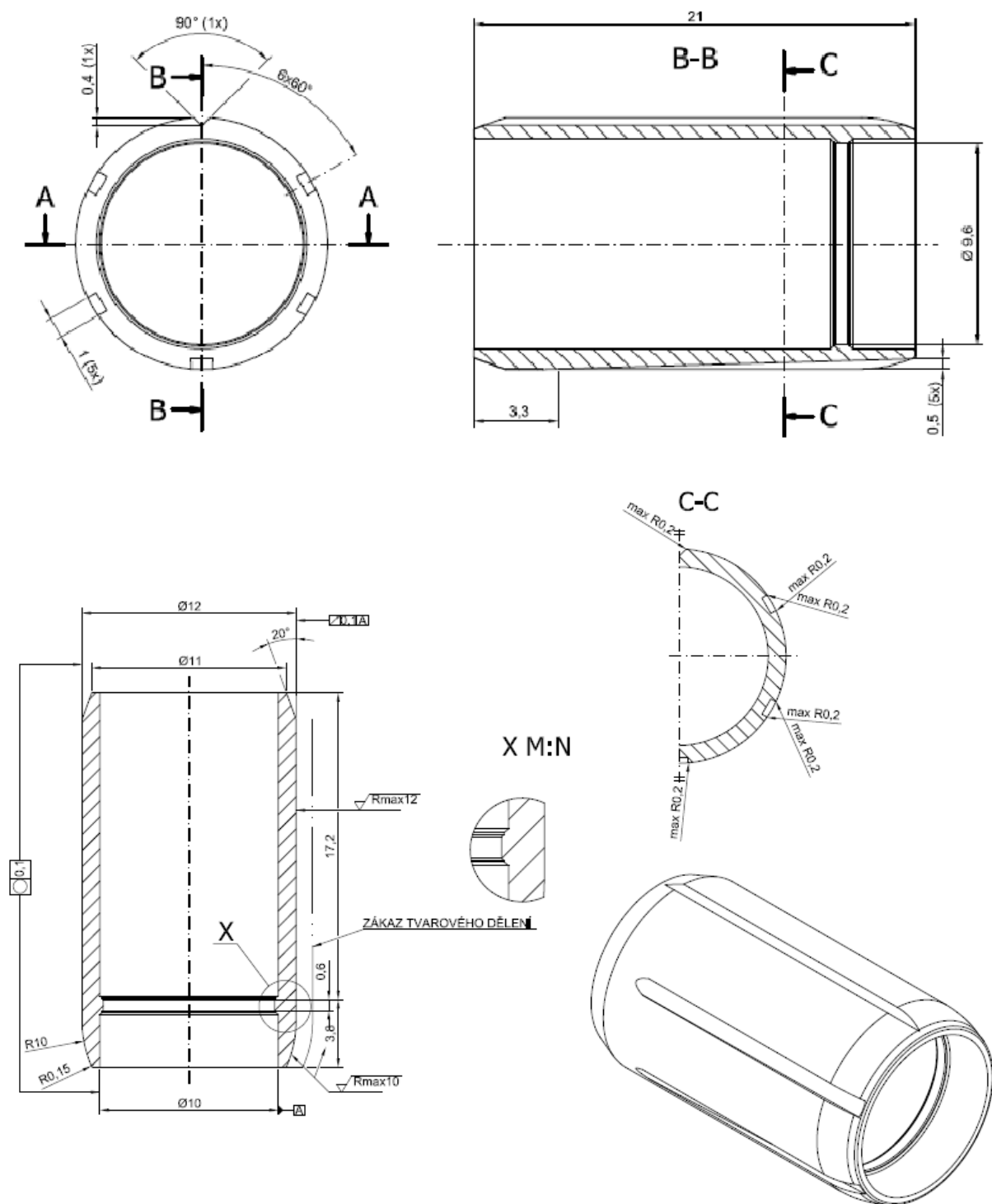
Omezení

- není vhodné pro vysoké rychlosti
- není vhodné pro velké zátěže

Tabulka 2 : vlastnosti tlumení samočinně nastavitelného

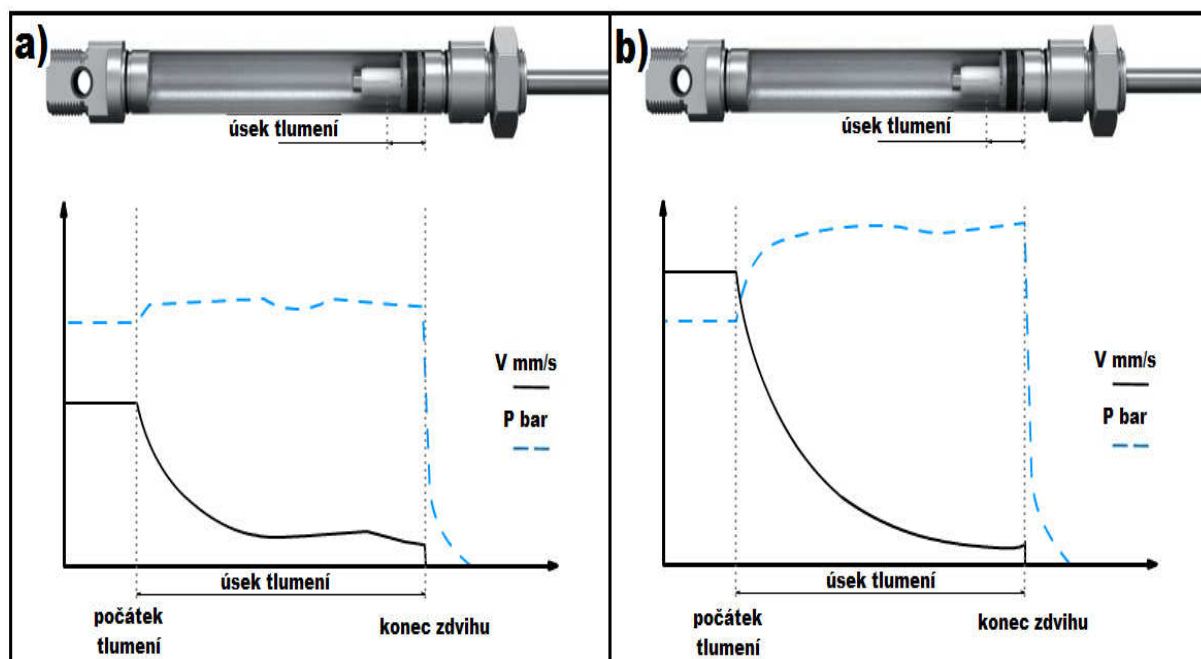


Obrázek 12 : princip tlumení [4]



Obrázek 13 : tlumící kolík samočinně nastavitelného tlumení od firmy Festo

3.3.1 Charakteristika tlumení



Obrázek 14 : charakteristiky samočinně nastavitelného tlumení (jak je uvedeno v [4])

a) rychlosti pístu nízká b) rychlost pístu vysoká

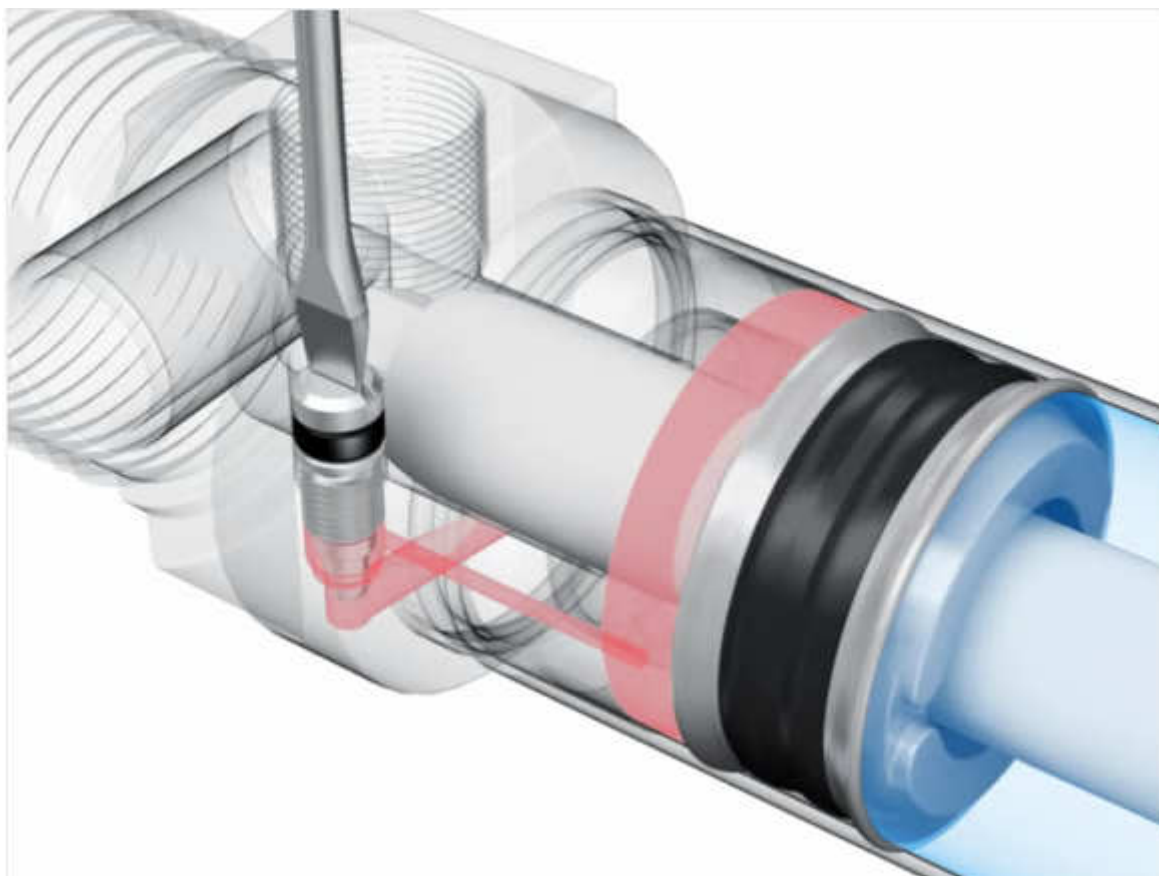
- a) Poměrně stálé zpomalení a díky tomu jemný dojezd do koncové polohy, výsledek křivky se stálým tlakem.
- b) Poměrně stálé zpomalení a tedy plynulý dojezd do koncové polohy jsou výsledkem křivky se stálým tlakem.

3.4 Pneumatické nastavitelné tlumení

Vedle vnějšího a hydraulického tlumení je nastavitelné tlumení nejznámějším způsobem tlumení, jak je uvedeno v [4]. Energie nárazu v koncových polohách je pohlcována pomocí cíleně tvořeného omezení odvětrání vzduchu. Válec je vybaven speciálními tlumicími písty ve formě prodloužení hlavního pístu. Relativně dlouhé tlumicí písty tvoří vzduchový polštář v konci zdvihu před dosažením dorazu. Odvětrání tohoto polštáře lze nastavit pomocí seřizovacích šroubů v koncových víkách.



Obrázek 15 : pneumatické nastavitelné tlumení [4]



Obrázek 16 : princip tlumení [4]

Výhody:

- vysoká hodnota pohlcené energie
- možnost nastavení v obou koncových polohách
- snížení hluku

Nevýhody:

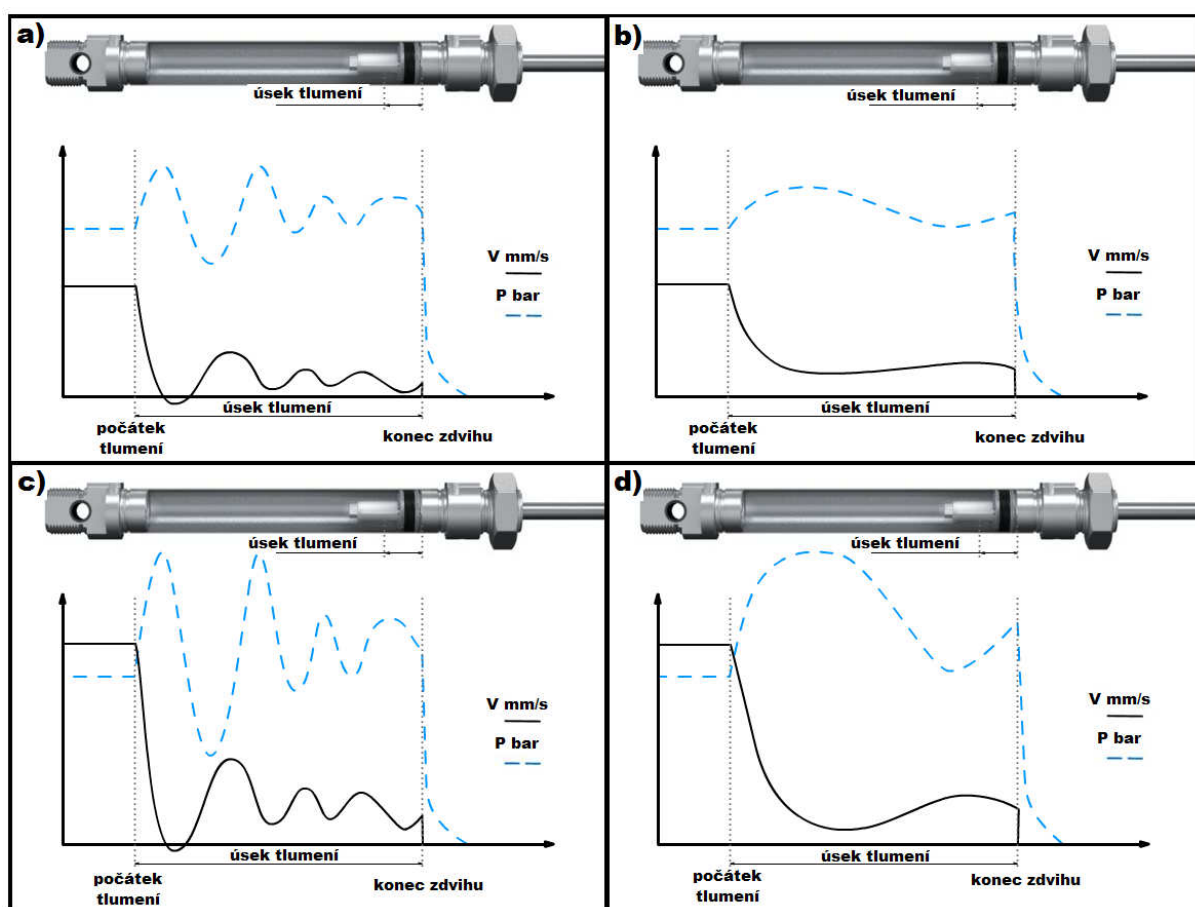
- měnící se zatížení a rychlost vyžaduje nové ruční nastavení tlumení

Použití:

- střední až vysoké zatížení
- vysoké rychlosti
- velká energie nárazu

Tabulka 3 : vlastnosti nastavitelného tlumení

3.4.1 Charakteristika tlumení



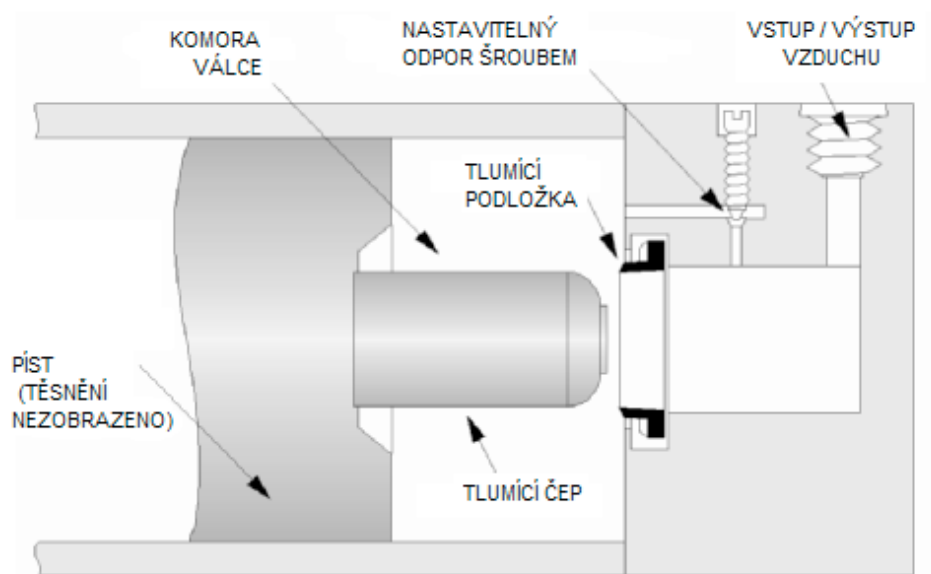
Obrázek 17 : charakteristiky nastavitelného tlumení (jak je uvedeno v [4])

a) tlumení neseřízeno, rychlost pístu nízká b) tlumení seřízeno, rychlost pístu nízká c) tlumení neseřízeno, rychlosti pístu vysoká d) tlumení seřízeno, rychlost pístu vysoká

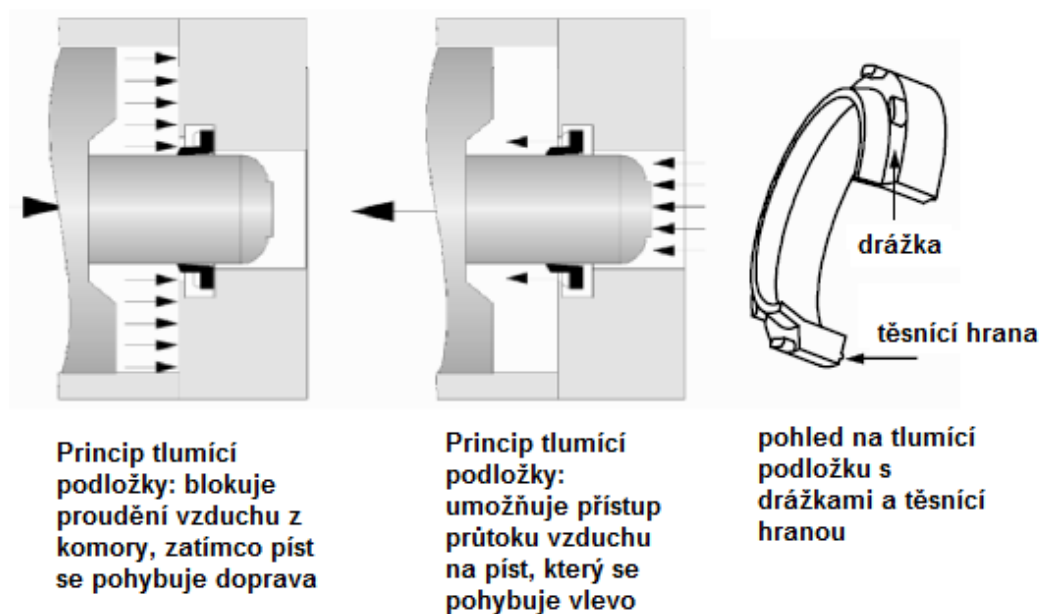
- Špatně nastavené nebo neseřízené tlumení v koncové poloze způsobuje výkyvy v průběhu tlaku a nerovnoměrný dojezd do koncové polohy.
- Správně nastavené tlumení zajišťuje rychlý náběh tlaku, který způsobuje neproporcionální zpomalení pohybu pístu. Z tohoto důvodu je pohlcení energie poněkud vyšší, než u srovnatelného samočinně nastavitelné tlumení.
- Špatně nastavené nebo neseřízené tlumení v koncové poloze způsobuje výkyvy v průběhu tlaku a nerovnoměrný dojezd do koncové polohy.
- Správně nastavené tlumení zajišťuje rychlý náběh tlaku, který způsobuje neproporcionální zpomalení pohybu pístu. Z tohoto důvodu je pohlcení energie poněkud vyšší, než u srovnatelného samočinně nastavitelné tlumení.

3.5 Tlumící podložka

Existuje několik typů tlumící podložky, ale princip fungování je stejný. Obrázek 18 ukazuje typ s tlumící podložkou v zadním víku. Tlumení probíhá takto: píst se pohybuje rychle zleva vpravo směrem k zadnímu víku. Vzduch je odvzdušněn středem, tento tok vzduchu je náhle zastaven, když se tlumící čep dostane do tlumící podložky. Vzduch teď může unikat mnohem menší cestou, která je říditelná nastavitelným šroubem a tím se zpomalí dojezd pístu do koncové polohy jak je uvedeno v [2].



Obrázek 18 : tlumení pomocí tlumící podložky (jak je uvedeno v [2])



Obrázek 19 : princip tlumení (jak je uvedeno v [2])

3.6 Damp & Seal

Damp & Seal firmy Simrit kombinují tři funkce v jeden komponent oproti klasickému tlumení.

- pneumaticky tlumí píst pomocí škrcení vzduchu
- mechanicky tlumí na konci zdvihu,
- těsní staticky hrany válce



Obrázek 20 : tlumení Damp & Seal [7]



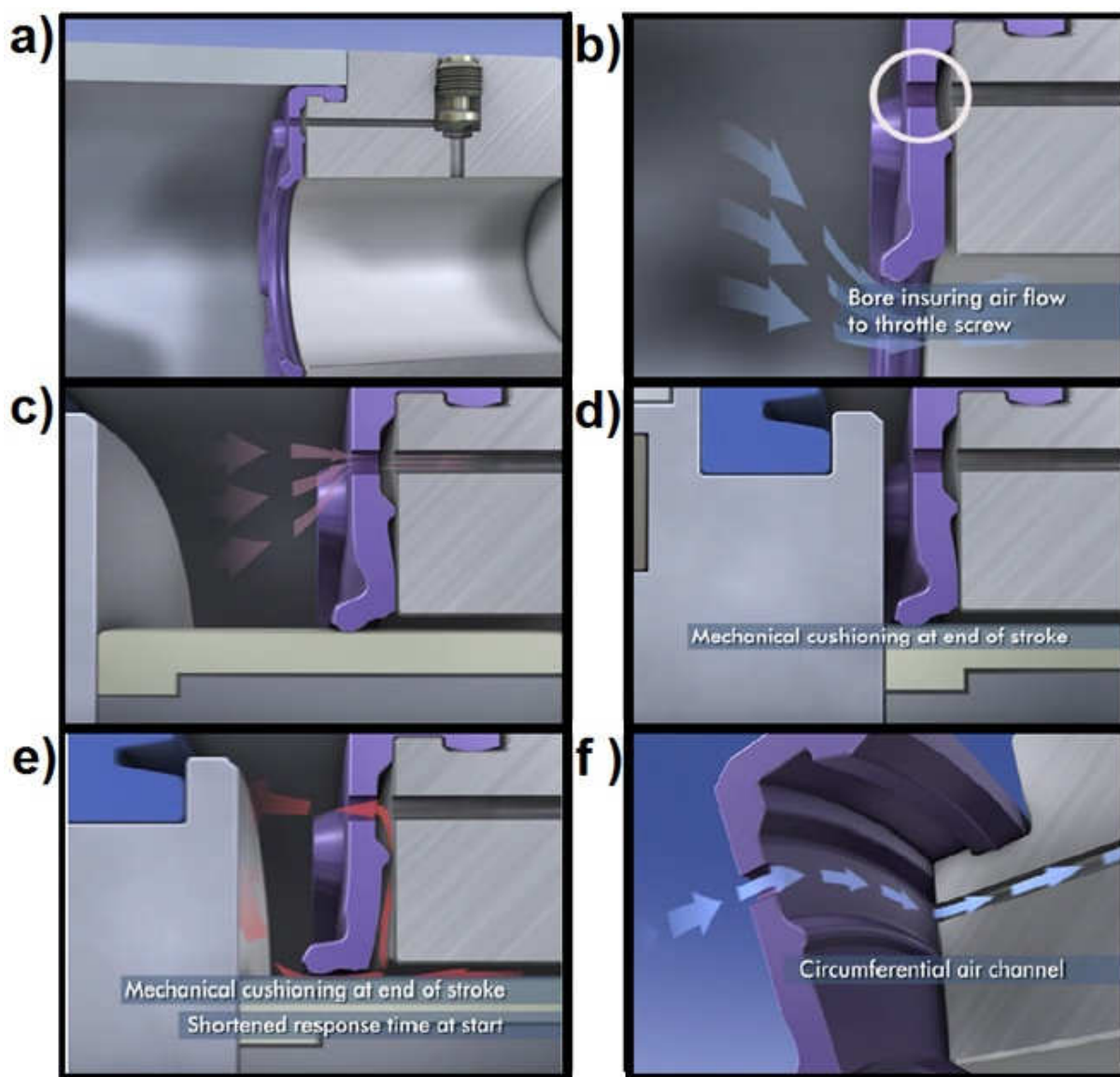
Obrázek 21 : válec s tesněním Damp & Seal [7]

Výhody :

- Víko válce bez složitých vybrání => vyžaduje méně složité obrábění
- Vyžaduje velmi málo místa
- Není nutné přesné montážní umístění díky cirkulačním kanálkům

- Nesprávná montáž je prakticky nemožná: Damp & Seal lze instalovat pouze v jednom směru.
- minimalizace hluku díky vysoké pružnosti polyuretanových tlumicích polštářků => zvýšení bezpečnosti práce

Princip tlumení :



Obrázek 22 : princip tlumení (jak je uvedeno v [7])

- a) umístění těsnění ve válci b) volný průchod vzduchu kolem těsnění, otvor zajišťuje proudění vzduchu na škrtkový šroub
 c) po uzavření průtoku vzduchu tlumicím kolíkem, může vzduch odcházet pouze přes otvor v těsnění (tím dochází k tlumení) d) mechanické tlumení na konci zdvihu e) pohyb zpět - vzduch prochází přes těsnění dle obrázku(zkrácená reakční doba na začátku f) proudění vzduchu v obvodovém kanálku.

3.7 Externí tlumiče

3.7.1 Hydraulické tlumiče nárazu

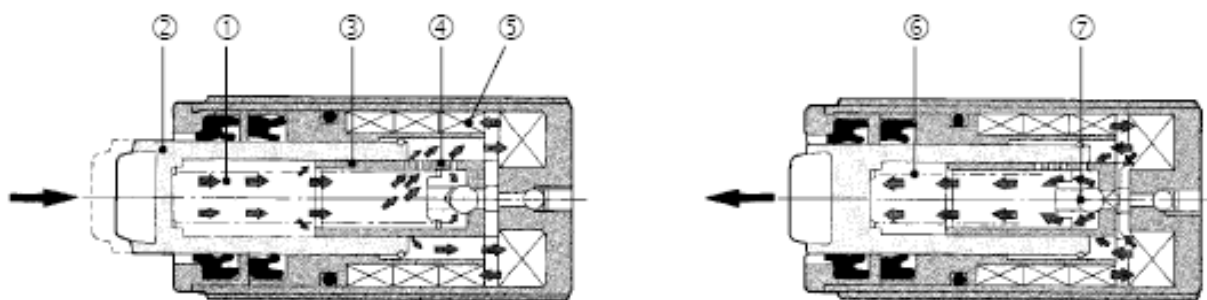
Funkce hydraulického tlumiče jak je uvedeno v [8] :

„V klidu je *vnitřní prostor* ① tlumiče zaplněn olejem. Pohybující se těleso tlačí po dotyku *pístnici* ② doprava a zmenšením objemu se zvýší tlak oleje v pístu ③. Olej zvýšeným tlakem prochází řadou otvorů ④ v *pístu* ③ do *akumulátoru* ⑤. Stlačením oleje se vyvine hydraulická síla, která působí proti pohybu pístu a tedy i proti směru působení kinetické energie, která se postupně tímto způsobem utlumí.

Na počátku pohybu pístnice je síla tlumiče proti pohybu tělesa malá. S postupujícím zasouváním pístnice do tělesa tlumiče stoupá až na maximální hodnotu. Tak je vyloučen při styku tělesa s pístnicí tlumiče tvrdý náraz a zajištěn postupný nárůst síly, působící proti pohybu tělesa (brzdné síly).

Olej, který protéká *otvory* ④ v *pístu* ③ do *akumulátoru* ⑤. Akumulátor tvoří prstence ze syntetické pryže. V tomto materiálu je velké množství vzduchových bublin, takže je velmi elastický a olej přivedený do akumulátoru stlačí tyto prstence a vyplní uvolněný prostor.

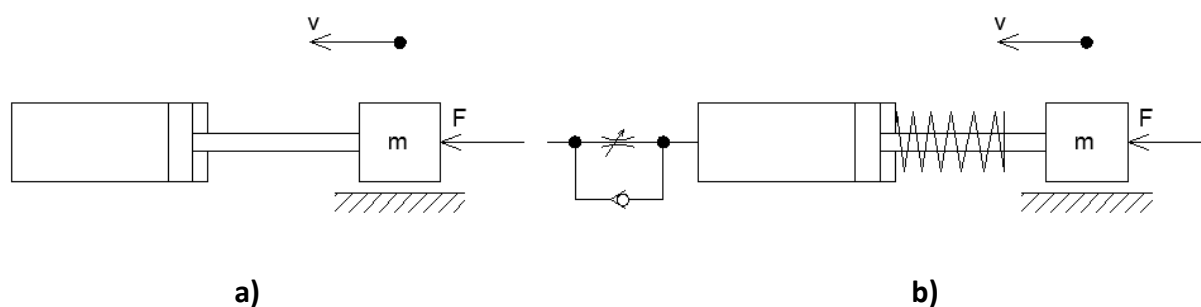
Při opačném pohybu tělesa se *pístnice* ② uvolní a je vytlačována z tělesa tlumiče *pružinou* ⑥. Tím se sníží tlak v *pístnici* ②, ve dně *pístu* ③ se otevře zpětný *ventil* ⑦ a olej z *akumulátoru* ⑤ je vytlačován zpět do prostoru pístu a pístnice. Tlumič je připraven k dalšímu použití“.



Obrázek 23 : podélný řez tlumičem [8]

3.7.2 Pneumatické tlumiče nárazu

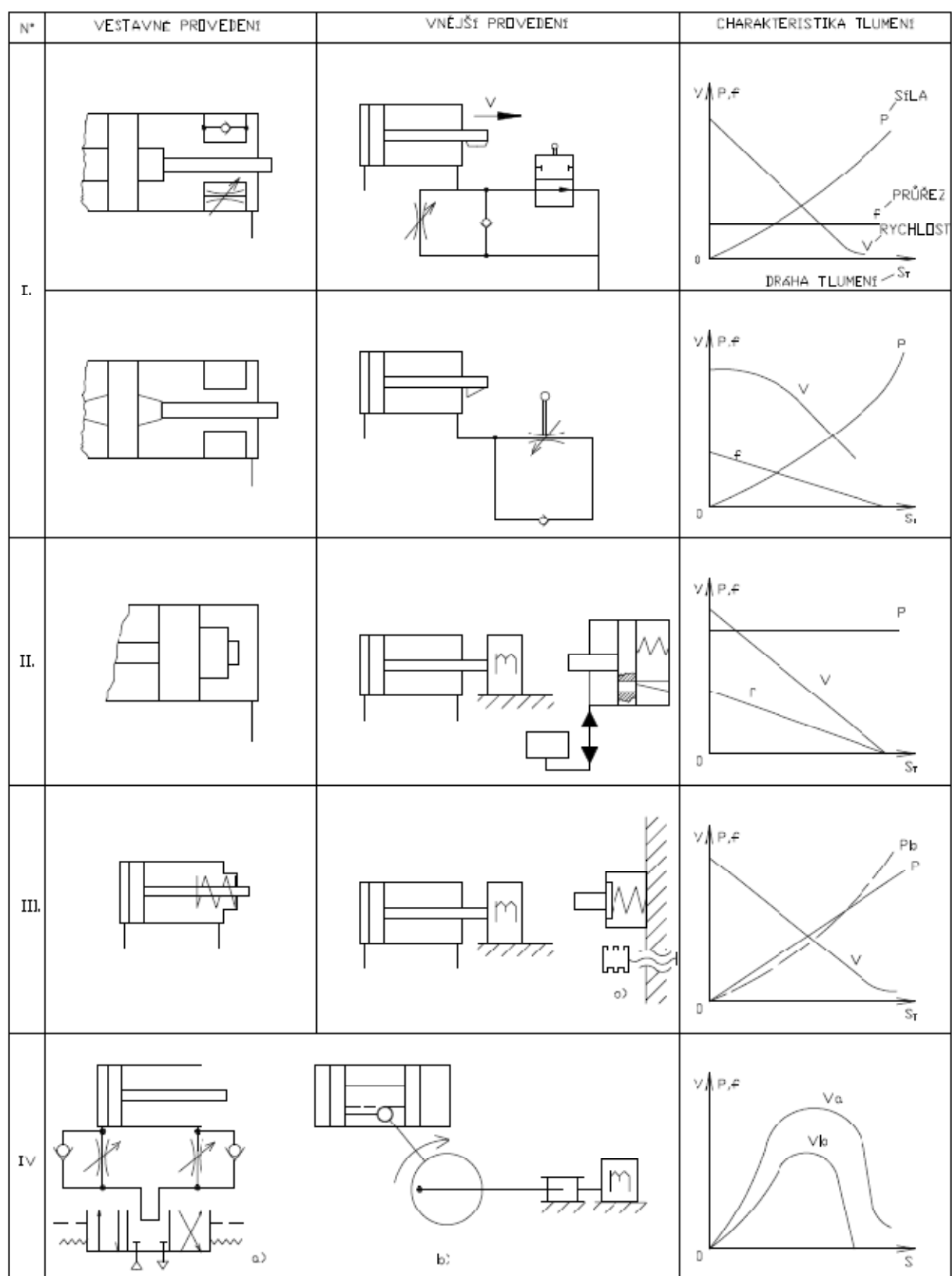
Jak je uvedeno v [10] pneumatické tlumiče nárazu se používají jak k částečnému, tak i k úplnému utlumení zbytku energie, která je akumulována setrvačnými silami mechanismu v konečných fázích jeho pohybu. Tímto odstraníme nebezpečné rázy, které nám mohou způsobit mechanické poškození části mechanismu, nebo i celého stroje. Výhoda pneumatického tlumiče oproti často používaným tlumičům mechanickým a hydraulickým je především v jejich jednoduché konstrukci a v možnosti regulovat progresivně tlumící účinek. Pneumatické tlumiče se vyrábí ve dvou základních provedení, a to s uzavřeným objemem vzduchu (Obrázek 24a), kde vzduch při jeho expanzi působí jako pružina, přičemž kinetická energie pohybujícího se mechanismu se mění v tlakovou energii stačeného vzduchu. Tento typ pneumatického tlumiče se používá pro tlumení menších hmot s častou reverzací pohybu. Druhým provedením pneumatického tlumiče je konstrukční princip pracující s proměnlivým objemem vzduchu, kdy při kompresi se současně část vzduchu z tlumiče vypouští regulovatelným škrcením, kterým si můžeme regulovat intenzitu tlumení. Prostor se opět naplní vzduchem při zpětném pohybu pístu. Tento zpětný pohyb je zajištěn pomocí tažné pružiny, která je umístěna buď uvnitř nebo vně tlumiče. Tlumiče s regulovatelnou intenzitou tlumení se používají zejména při potřebě zajistit plynulejší tlumení velkých hmot, případně k utlumení průběhu pohybu či rychlosti během tlumení až k úplnému zastavení



Obrázek 24 : Konstrukční principy tlumičů

a- s uzavřeným objemem, b- s regulovatelnou intenzitou tlumení

3.8 Možná náhrada vestavného tlumení tlumením vnějším



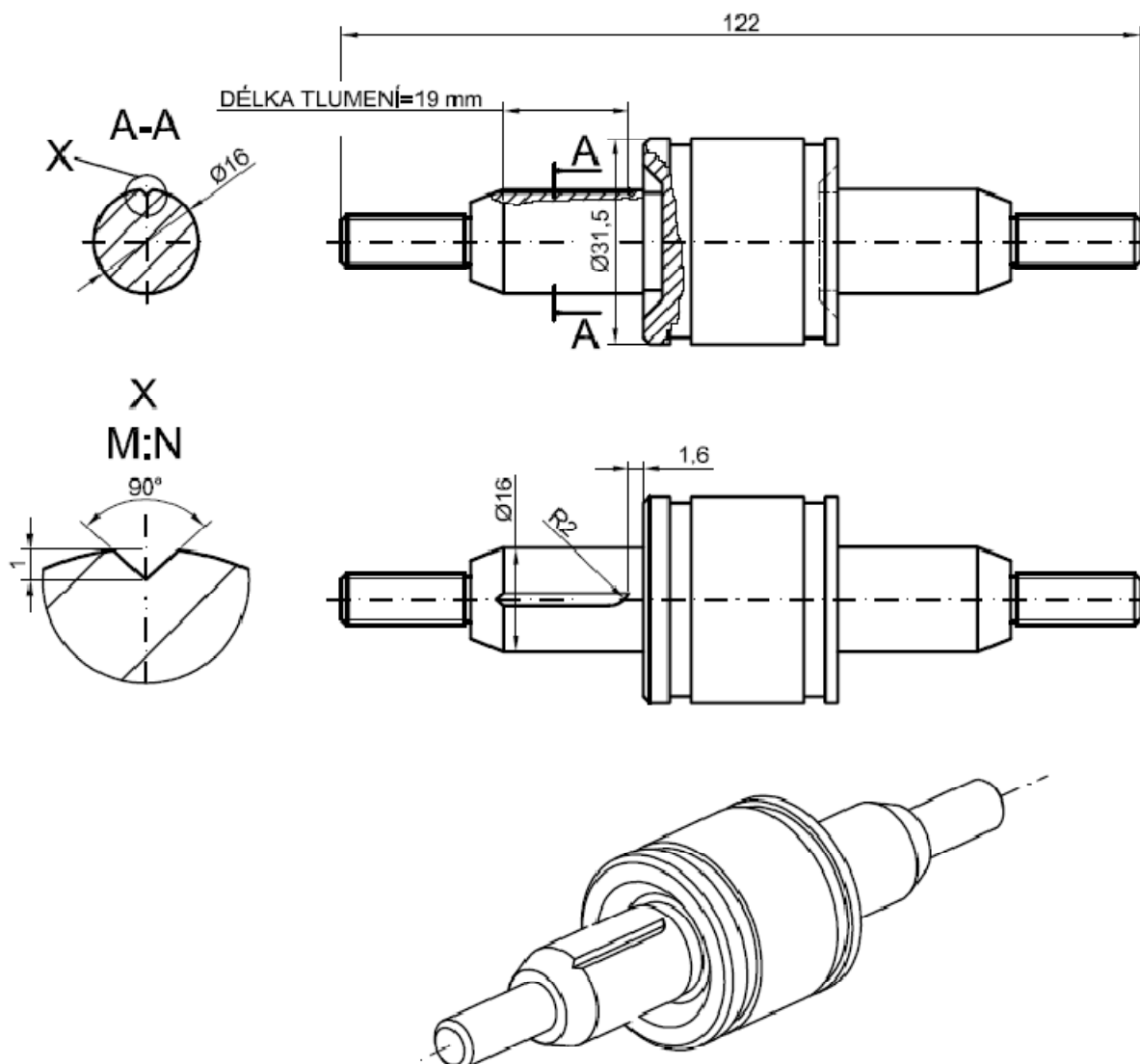
Obrázek 25 : možné způsoby náhrady vestavného tlumení tlumením vnějším (jak je uvedeno v [12])

4. Praktická část diplomové práce

V této části diplomové práce jsme si navrhli experimentální zařízení, vycházející s funkce samočinně nastavitelného tlumení, pro tlumení dojezdu pístu přímočarého pneumomotoru do koncové polohy včetně vhodných snímačů. Obrázky experimentálního zařízení jsou v příloze.

4.1 Návrh experimentálního zařízení

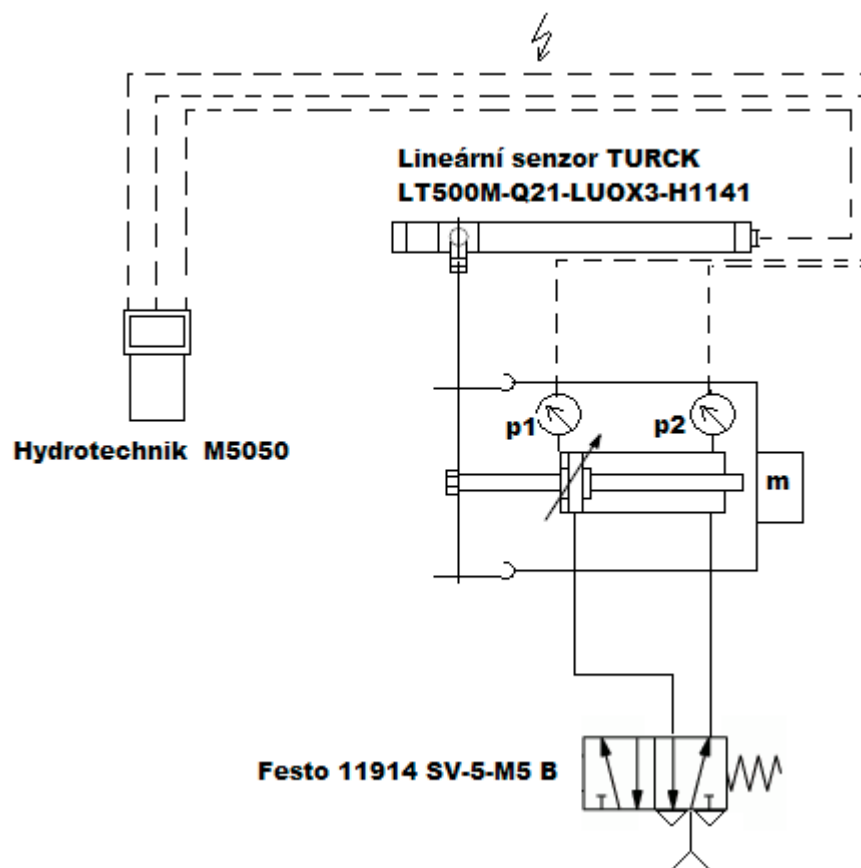
Abychom mohli porovnat tlumení dojezdu pístu do koncové polohy pomocí "drážky" a škrtkícího ventilu, upravili jsme válec s oboustranně vedenou pístnicí tak, že na jedné straně byla vyfrézována drážka a uzavřen škrtkící ventil, čímž bylo tlumení pomocí škrtkícího ventilu odstraněno a tlumilo se jenom pomocí drážky. Na protější straně probíhalo tlumení jenom pomocí škrtkícího ventilu. Takto jsme mohli na jednom válci měřit charakteristiky tlumení pomocí dvou druhů tlumení. Dále jsme museli upravit víka pneumomotoru, do kterých jsem navrtali otvory a namontovali šroubení a to proto abychom byli schopni připojit tlakoměry tak, aby bylo možné snímat tlak přímo ve válci, což není normálně možné. (pozn. Běžně lze napojit snímač až na výstup).



Obrázek 26 : zjednodušené řešení tlumení pomocí drážky

Experimentální zařízení tlumení dojezdu pístu přímočarého pneumomotoru do koncové polohy jsme oproti zvolenému druhu tlumení, což je tlumení samočinně nastavitelné, zjednodušili. Jak je vidět na obrázku (Obrázek 36), je zde pouze jedna trojúhelníková drážka (průřezu 1 mm^2) oproti originálu (Obrázek 13), kde je jedna drážka trojúhelníková a 5 drážek obdélníkových. I přes toto zjednodušení vykazovalo tlumení drážkou lepší vlastnosti než tlumení škrtícím ventilem což si názorně ukážeme na grafech.

4.2 Postup měření



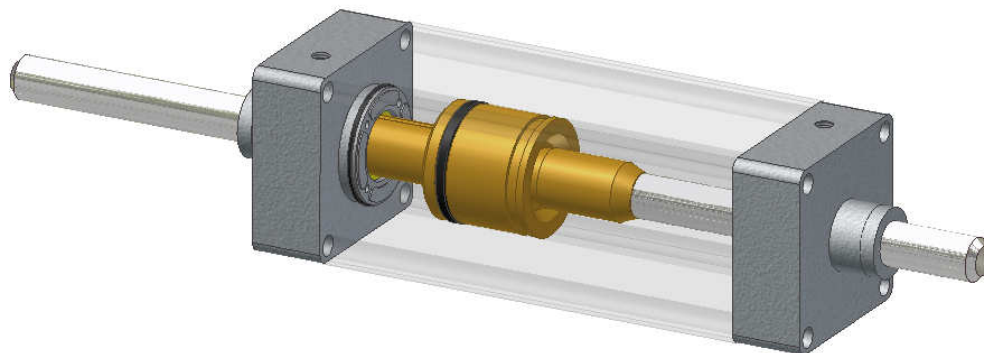
Obrázek 27 : schéma zapojení

Experimentální úlohu jsme zapojili podle výše uvedeného schématu (Obrázek 27). Před začátkem měření je nutné synchronizovat čas tlumení škrtícím ventilem s tlumením pomocí drážky, aby jsme poté mohli získané hodnoty porovnávat. Toto seřízení jsme provedli pomocí programu Hydrowin, ve kterém jsme si vytvořili zkušební graf obou tlumení a odečetli časy jednotlivých tlumení. Čas tlumení drážkou ovlivnit nemůžeme, proto musíme co nejvíce tomuto času přiblížit čas tlumení pomocí škrtícího ventilu a to tak, že ventil manuálně buď povolíme nebo přiškrtneme a opakujeme dokud nebude rozdíl minimální. Pro náš případ je čas tlumení drážkou roven $0,089\text{ s}$ a čas tlumení škrtícím ventilem roven $0,092\text{ s}$. Seřízení bylo úspěšné, rozdíl je minimální, proto jsme mohli přikročit k měření. Budeme měřit hodnoty tlaku před a za pístem pomocí dvou tlakoměrů, dále polohu pístu pomocí lineárního senzoru. Všechny tyto hodnoty budeme zaznamenávat pomocí přístroje Hydrotechnik M5050. Budeme tedy zaznamenávat hodnoty tlaku $p1, p2$ poté polohu $s1$ a z její derivace také rychlost $v1$. Měření provedeme pro tlaky 4 bar , 5 bar , 6 bar a pro různou zátěž 0 kg , 6 kg , $8,855\text{ kg}$ a $10,285\text{ kg}$. Hodnoty z měření vyneseme do grafů (viz příloha, Graf 1, Graf 2, Graf 3), ve kterých porovnáme tlumení drážkou a tlumení škrtícím ventilem.

4.2.1 Použité prvky:

- *Přímočarý pneumomotor z oboustranně vedenou pístnicí*

Průměr pístu 32 mm, průměr pístnice 12 mm, zdvih 80 mm, průměr tlumícího kolíku 16 mm a délka tlumení 19 mm.



Obrázek 28 : přímočarý pneumomotor

- *Rozvaděč Festo 11914 SV-5-M5 B*

5/2 monostabilní rozvaděč s provozním tlakem 0-8 bar a normálním jmenovitým průtokem 95 l/min. Délka hadic byla 0,5 m o průměru 4 mm.



Obrázek 29 : rozvaděč 5/2

- *Vysoce přesný digitální tlakový snímač ISE40 firmy SMC*

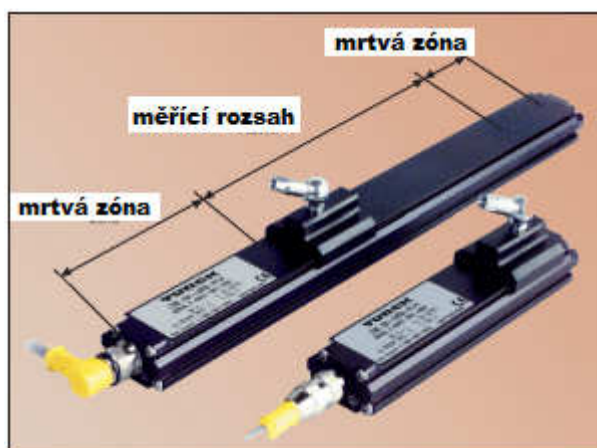
ISE40 snímá jmenovitý tlak 0,000 až 1,000 MPa výstupním napětím 1-5 V $\pm 2,5\%$



Obrázek 30 : tlakový snímač

- *Lineární senzor Turck LT500M-Q21-LUOX3-H1141*

Pístnice pneumomotoru je mechanicky spojena se snímacím magnetem magnetostrikčního lineárního senzoru polohy. Dráhu 0...500 mm senzor snímá analogovým napěťovým výstupem 0...10 V se zobrazovací frekvencí 2 ms.



Obrázek 31 : lineární senzor Turck

- *Hydrotechnik Multi-system 5050*

Přístroj je schopen zpracovat napětíové signály senzorů uložit je do paměti a poté exportovat do počítače, kde je můžeme dále zpracovávat pomocí firemního software. Má 6 vstupů (4x6pin, vstupy analogového signálu Ch1 až Ch4 : 0 až 20 mA, 4 až 20 mA nebo 0 až 10 V, volitelné přes interní software. 2x6pin, vstupy digitálního signálu Ch5 a Ch6 (frekvence) 0,25 Hz až 5000 Hz).



Obrázek 32 : hydrotechnik 5050

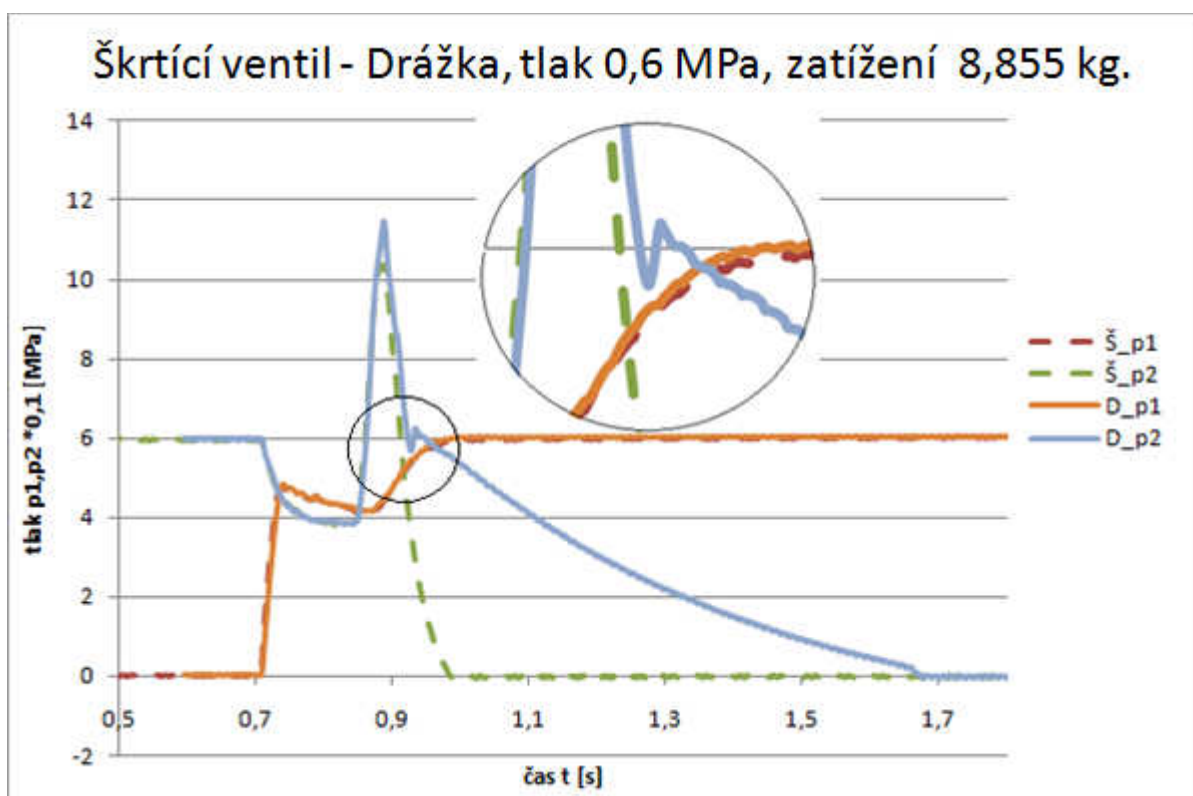
- *Kompresor*

Plnění (0 bar) 50 l/min, vyprazdňování (8 bar) 32 l/min, max. tlak 8 bar, max. pracovní doba 15 min. (rychlost určována pomocí derivace dráhy).



Obrázek 33 : kompresor

4.3 Vyhodnocení měření



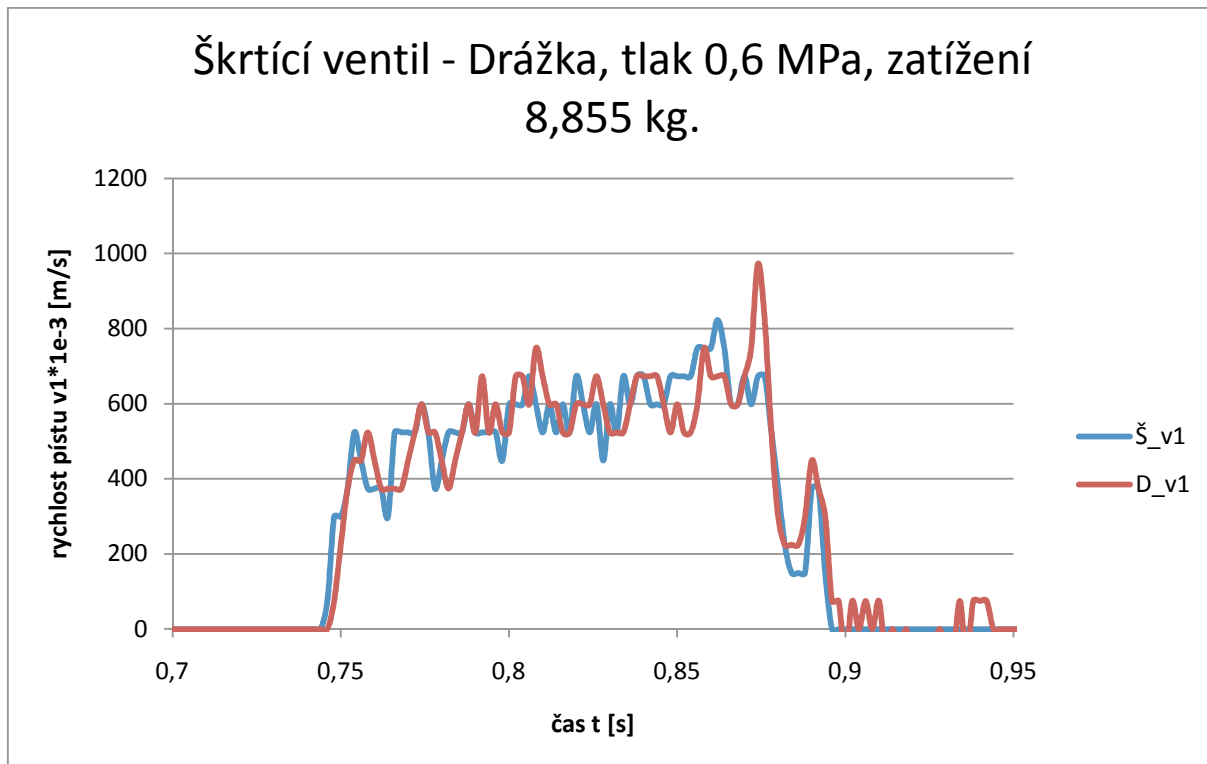
Graf 1 : porovnání tlaků, při tlumení, před a za pístem

Porovnali jsme grafy tlaku před a za pístnicí při tlumení "drážkou" a škrťícím ventilem. Průběhy tlumení pomocí drážky jsou zakresleny plnou čarou (u průběhu tlaků) označenou D , naopak tlumení škrťícím ventilem je vyznačeno čárkovanou čarou (u průběhu tlaků) označenou \check{S} . Jak vidíme na grafu (Graf 1) píst pneumomotoru se začne pohybovat díky zvyšování tlaku $p1$, tím se začne odvětrávat protilehlá komora a tlak $p2$ v odvětrávané komoře začne klesat až do doby, kdy rozšířená část pístnice (tlumící kolík) najede na těsnění a tím zamezí volný průchod stlačeného vzduchu, který nyní může odcházet pouze průřezem drážky (průtočným průřezem škrťícího ventilu). Začne se tlumit kinetická energie a dojde k první kompresi vzduchu. Ke druhé kompresi tlaku dojde pouze už u škrčení pomocí "drážky" a to na konci zdvihu, tam kde drážka začne měnit svůj průřez (Obrázek 34). "Drážka se začne zužovat, a tedy začne vymezovat jen velmi malý prostor, kterým může vzduch odcházet, tímto se pohyb pístu ještě lépe dotlumí. U tlumení škrťícím ventilem k druhé kompresi vzduchu tedy nedojde, protože škrťící ventil má pořád stejný průřez, kterým může vzduch unikat. Firma Festo uvádí, že samočinně nastavitelné tlumení se automaticky přizpůsobuje změnám zátěže. Toto tvrzení je patrné i z našeho měření na zjednodušeném

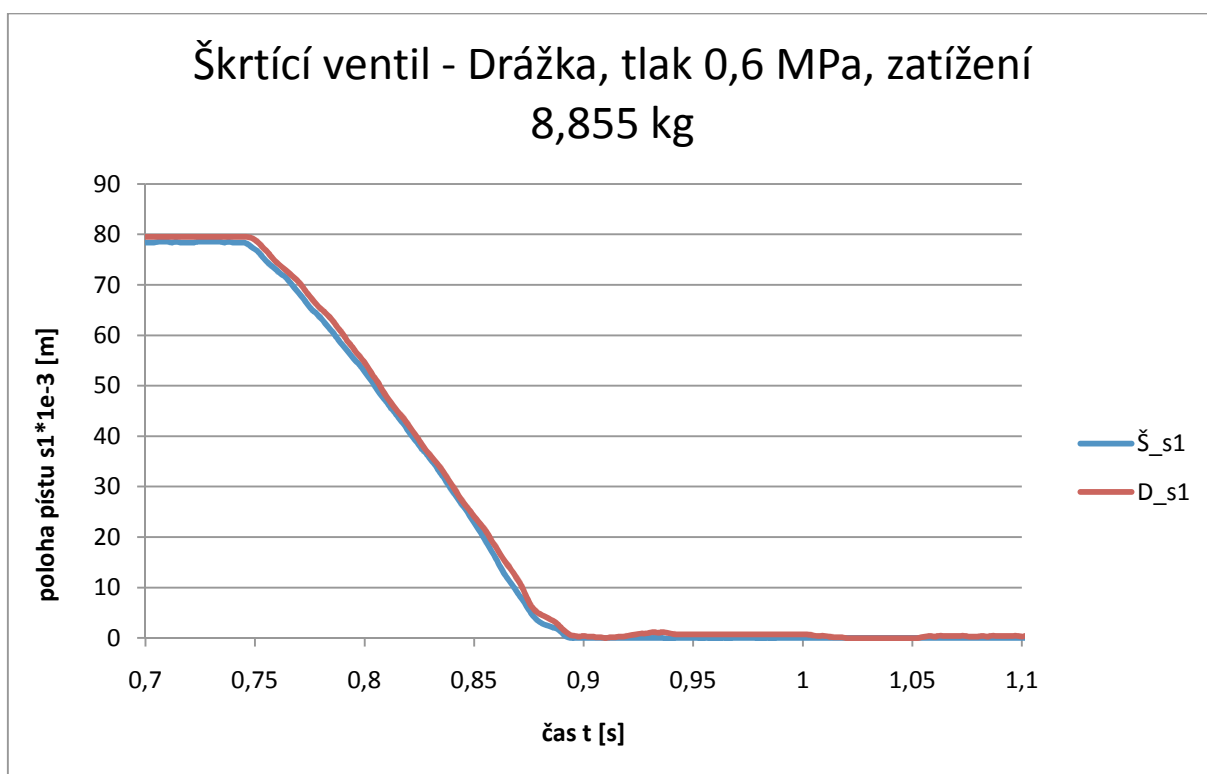
modelu, při porovnání grafů experimentálního měření pro různé hmotnostní zatížení pístnice pohlcuje tlumení kinetickou energii stejně.



Obrázek 34 : detail drážky



Graf 2 : porovnání rychlosti pístu při různém tlumení



Graf 3 : porovnání polohy pístu při různém tlumení

Jak vidíme u ostatních grafů, hodnoty tlumení drážkou a škrtícím ventilem jsou velmi podobné, to je zapříčiněno zjednodušením tlumení pomocí drážky. Jak je patrné z grafu (Graf 1) je velmi důležité zúžení drážky, v našem případě zúžení je jen na velmi malé dráze tlumení, ale i tak jde vidět velký pokrok oproti tlumení se škrtícím ventilem. Tímto jsme si dokázali lepší vlastnosti tlumení drážkou oproti tlumení škrtícím ventilem (i na takto zjednodušeném modelu), toto tvrzení bylo možné porovnat i akusticky, kdy při dojezdu pístu do koncové polohy, vydalo tlumení drážkou daleko menší "klepnutí" tedy byla koncová poloha lépe dotlumena. Zbylé grafy porovnání tlumení jsou obsaženy v příloze.

5. Simulace tlumení dojezdu pístu přímočarého pneumomotoru do koncové polohy s praktickým měření

V této části diplomové práce si vytvoříme matematický model pneumomotoru s tlumením dojezdu pístu do koncové polohy, provedeme simulaci pro různý tlak a zatížení. Hodnoty poté zaneseme do grafu a porovnáme je s hodnotami získanými při měření tlumení dojezdu pístu přímočarého pneumomotoru do koncové polohy.

5.1 Tvorba zjednodušeného matematického modelu pneumomotoru

Matematický model tlumení přímočarého pneumomotoru jsme vytvořili pomocí programu Matlab-Simulink. Pomocí následujících rovnic pro klasické metody modelování pneumatického systému si vytvoříme základní model rozvaděče a pneumomotoru.

Hmotnostní průtok pneumatických ventilů je zastoupen v následujících dvou vzorcích:

pro nadzvukové (škrcené) proudění

$$Q_m = C \cdot p_1 \cdot \rho \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \quad \frac{p_2}{p_1} \leq b \quad (31)$$

pro podzvukové proudění

$$Q_m = C \cdot p_1 \cdot \rho \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\frac{p_2}{p_1} - b}{1 - b} \right)^2} \quad \frac{p_2}{p_1} > b \quad (32)$$

Kde C je zvuková vodivost, b je kritický poměr tlaků, p_1 je vstupní tlak a p_2 tlak výstupní.

Model pneumatického válce se skládá z těchto tří rovnic. První z nich je stavová rovnice vzduchu v plněném pracovním prostoru.

$$\frac{dp_s}{dt} = \frac{1}{V_s} \cdot \left(\frac{p_s \cdot V_s}{T_s} \cdot \frac{dT_s}{dt} + R \cdot T_s \cdot Q_s - p_s \cdot \frac{dV_s}{dt} \right) \quad (33)$$

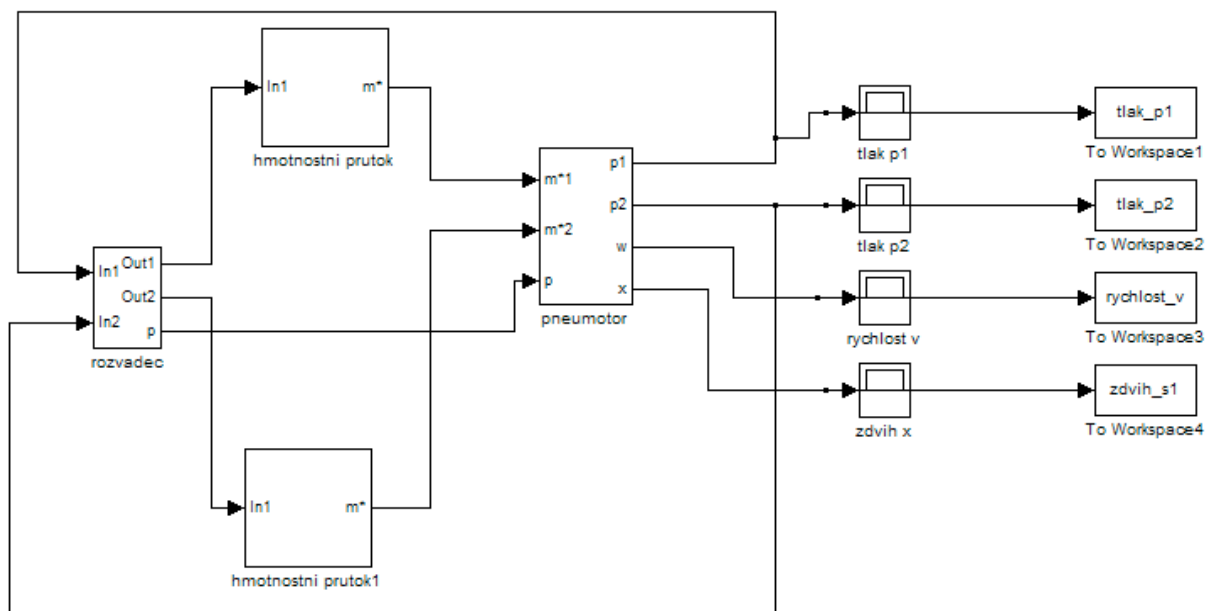
Podobně stavová rovnice vzduchu ve vyprazdňovaném pracovním prostoru.

$$\frac{dp_e}{dt} = \frac{1}{V_e} \cdot \left(\frac{p_e \cdot V_e}{T_e} \cdot \frac{dT_e}{dt} - R \cdot T_e \cdot Q_e - p_e \cdot \frac{dV_e}{dt} \right) \quad (34)$$

Třetí rovnice pneumatického modelu je pohybová rovnice pístu.

$$m \cdot \frac{dv_p}{dt} = p_s \cdot S_s - p_e \cdot S_e + p_{atm} \cdot (S_s - S_e) - m \cdot g \cdot \sin \alpha - F_{fr} - F \quad (35)$$

V rovnicích p je absolutní tlak, R je plynová konstanta, V je objem pracovních prostorů válce, T je termodynamická teplota, Q je hmotnostní průtok, S je plocha plněné nebo vyprazdňované strany pístu, m je hmotnost na pístní tyči, F_{fr} je třecí síla a F je zátěžová síla.



Obrázek 35 : základní model pneumomotoru

Tímto jsme si nadefinovali základní model pneumomotoru, (tvorba modelu je obsažena v příloze), který musíme ještě doplnit o tlumení drážkou. Délka drážky je 19 mm , tedy musíme nastavit že 19 mm před dosažením koncové polohy, tedy po posunu 61 mm celkového zdvihu, který je roven 80 mm, začne vzduch odcházet pouze drážkou. To znamená, že průtok se bude počítat pomocí rovnice rozvaděče, ale od dané polohy, tedy od začátku tlumení se průtok už nebude počítat podle modelu pro rozvaděč, ale přepne se na model tlumení "drážkou". Pro nadefinování proudění drážkou použijeme rovnici (36). Jak můžeme vidět na obrázku (Obrázek 32), drážka se na konci zužuje, což je velmi důležité, protože tím se vymezuje jen velmi malý prostor pro odvod vzduchu. Toto zúžení si do modelu také vložíme a to tak, že 2 mm před koncem zdvihu se průřez bude lineárně zmenšovat z hodnoty 1mm^2 na hodnotu $0,1\text{mm}^2$. Tedy až zdvih pneumomotoru dosáhne hodnoty 78 mm přepne se model tlumení drážkou na upravený model drážky, ve kterém je navíc nadefinováno zúžení drážky. Rovnici pro lineární zužování drážky si vytvoříme pomocí programu Excel (viz. Příloha).

Rovnice pro průtok drážkou :

$$Q_m = \mu \cdot A \cdot \psi \cdot \sqrt{2 \cdot p_2 \cdot \rho} \quad (36)$$

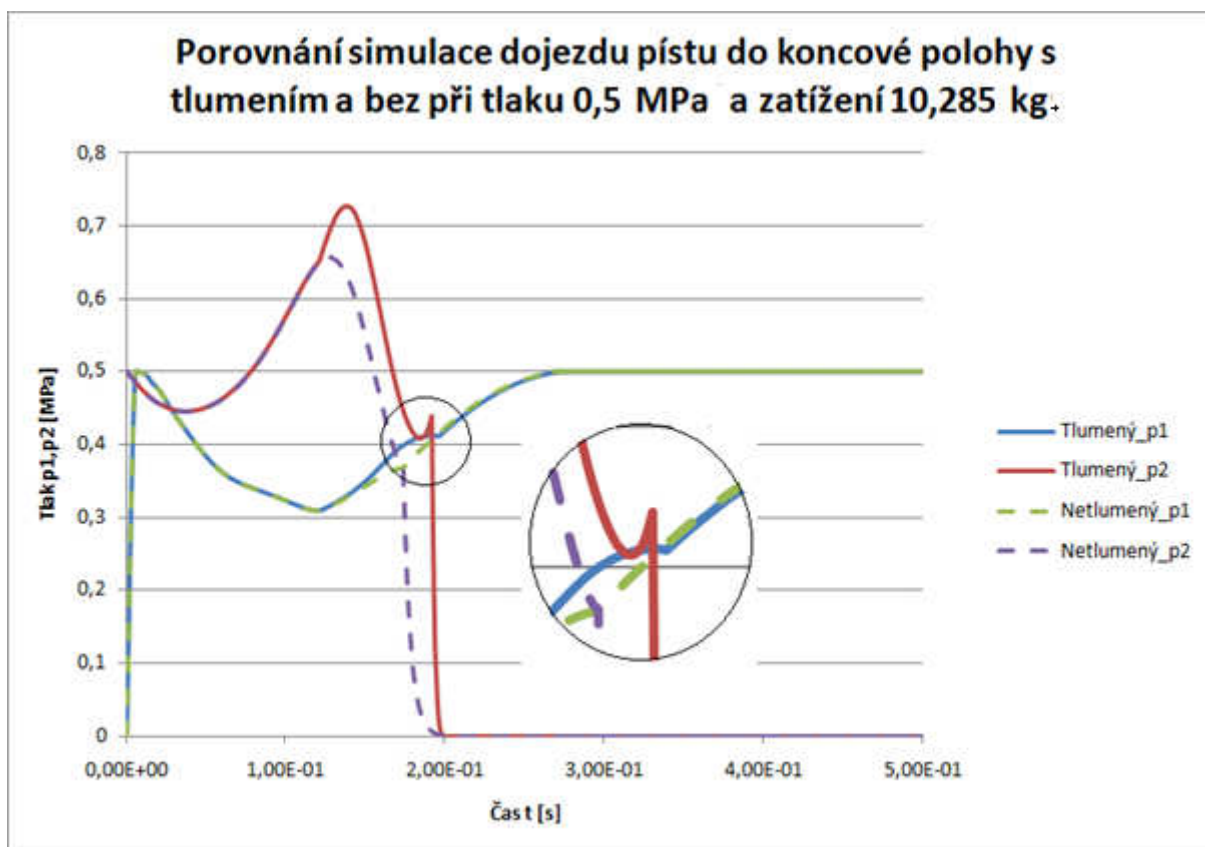
kde A je průřez drážky, μ je součinitel průtoku, ψ je koeficient rychlosti průtoku vzduchu.

5.2 Vyhodnocení simulace

Provedeme vyhodnocení simulace tlumení dojezdu pístu přímočarého pneumomotoru a simulací bez tlumení, na kterém si ukážeme výhody tlumeného motoru na dojezd pístu do koncové polohy. Dále porovnáme hodnoty tlumeného dojezdu ze simulace s hodnotami získanými z experimentálního měření tlumeného dojezdu a vyhodnotíme. Na závěr se pokusíme vytvořit model pneumomotoru s tlumením pomocí "drážky" zužující se po celé své délce, abychom se přiblížili samočinně nastavitelnému tlumení. Tyto charakteristiky poté porovnáme s modelem tlumící "drážkou" zužující se až na konci a vyhodnotíme rozdíly.

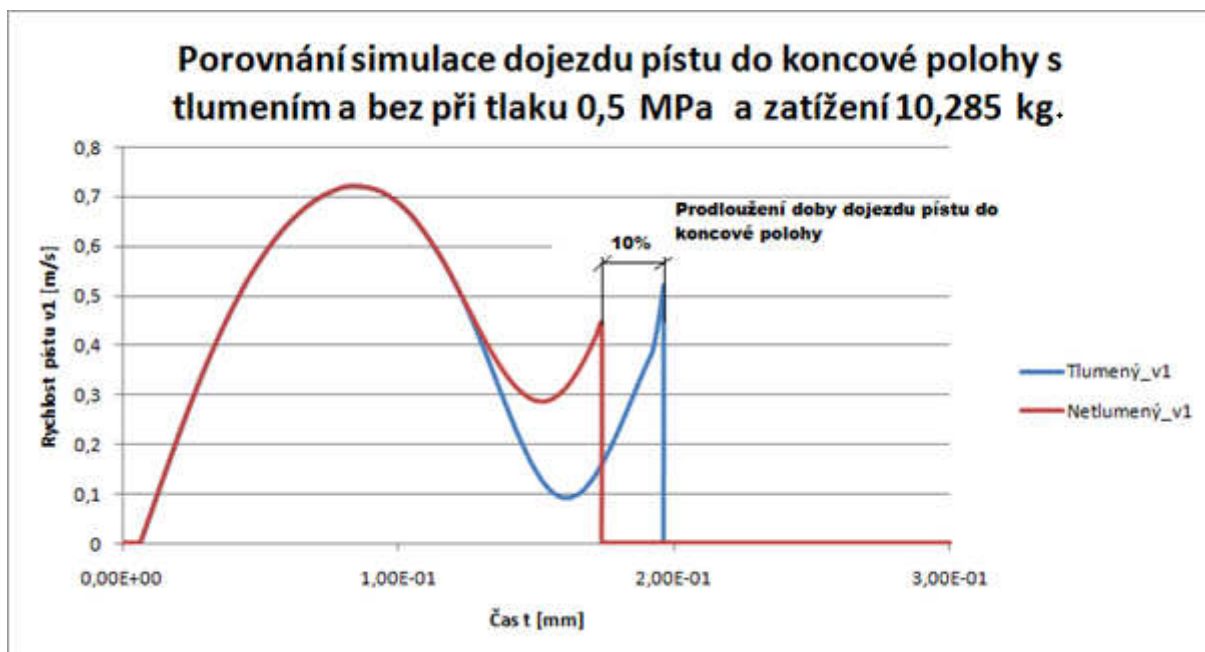
5.2.1 Porovnání tlumeného a netlumeného dojezdu pístu do koncové polohy pomocí simulace

Při porovnání tlaku před a za pístem jsme si ověřili správnost průběhu tlaku při měření tlumení drážkou. Jak je vidět i na detailu grafu (Graf 4), dojde při tlumeném dojezdu pístu pomocí drážky ještě k jedné kompresi vzduchu, jako tomu bylo i při experimentu.



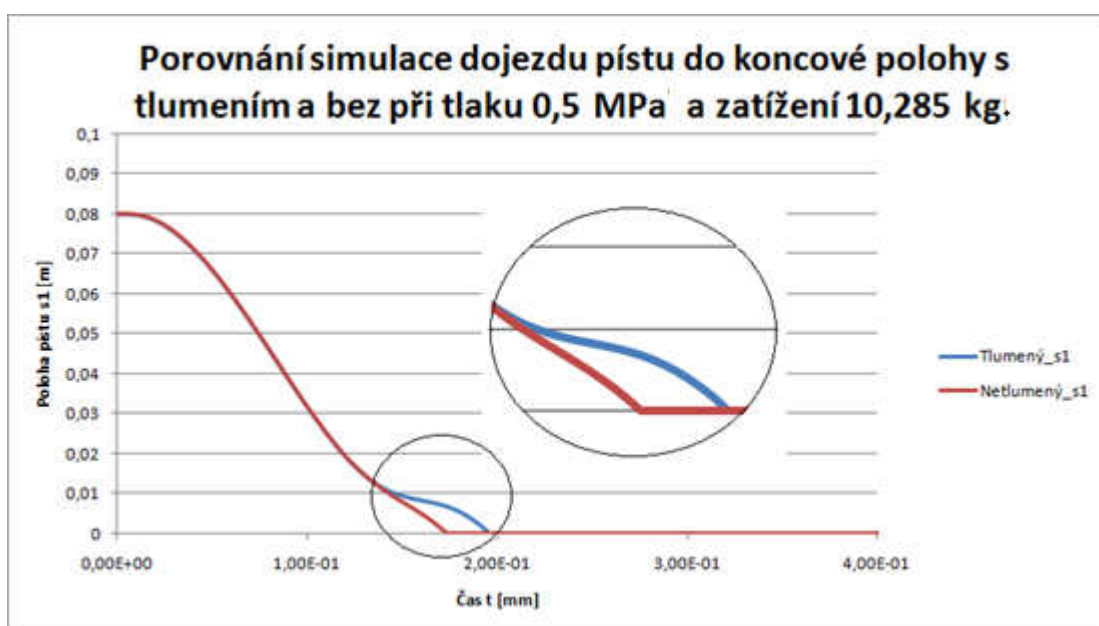
Graf 4 : porovnání tlaku před a za pístem

Správné nastavení matematického modelu je patrné i z porovnání rychlostí. Jak je možno vidět na grafu (Graf 5) doba zdvihu tlumeného dojezdu pístu do koncové polohy se prodlouží přibližně o 10%, tedy na konci zdvihu dojde k pozvolnějšímu dotlumení koncové polohy.



Graf 5 : porovnání rychlostí pístu

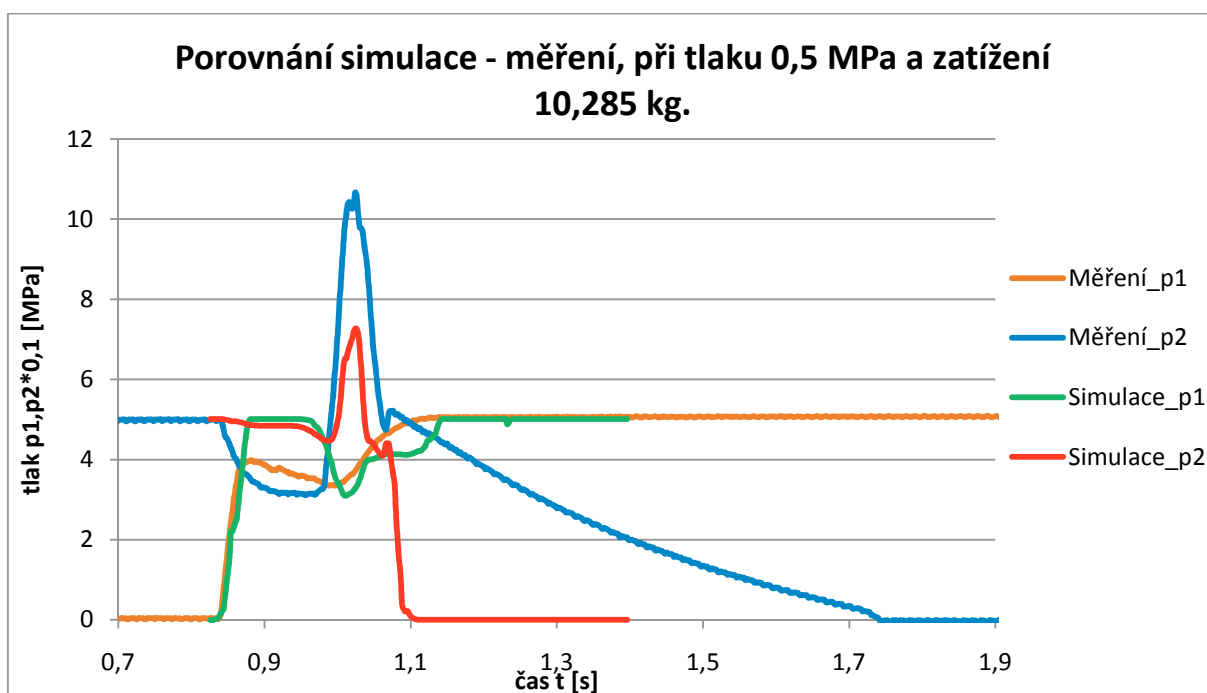
Na grafu polohy pístu (Graf 6) jde vidět pozitivní vliv tlumení na dojezd pístu do koncové polohy. Jak je patrné, tlumený dojezd je daleko lepší než dojezd pístu bez tlumení.



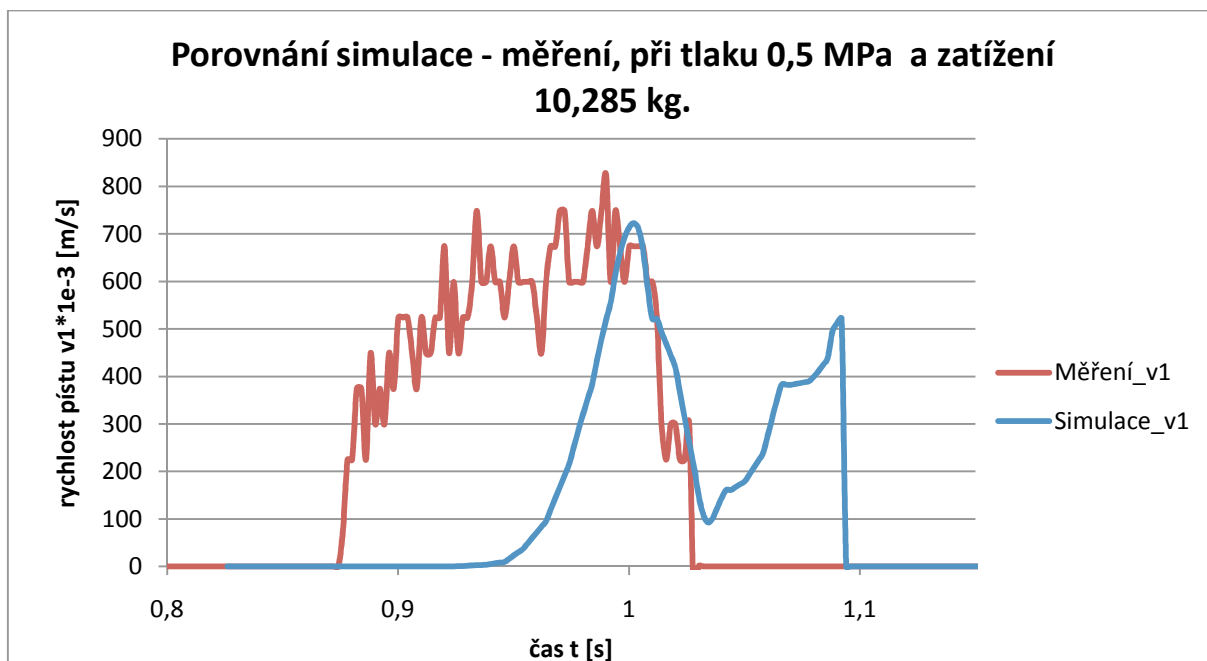
Graf 6 : porovnání polohy pístu

5.2.2 Porovnání simulace s měřením

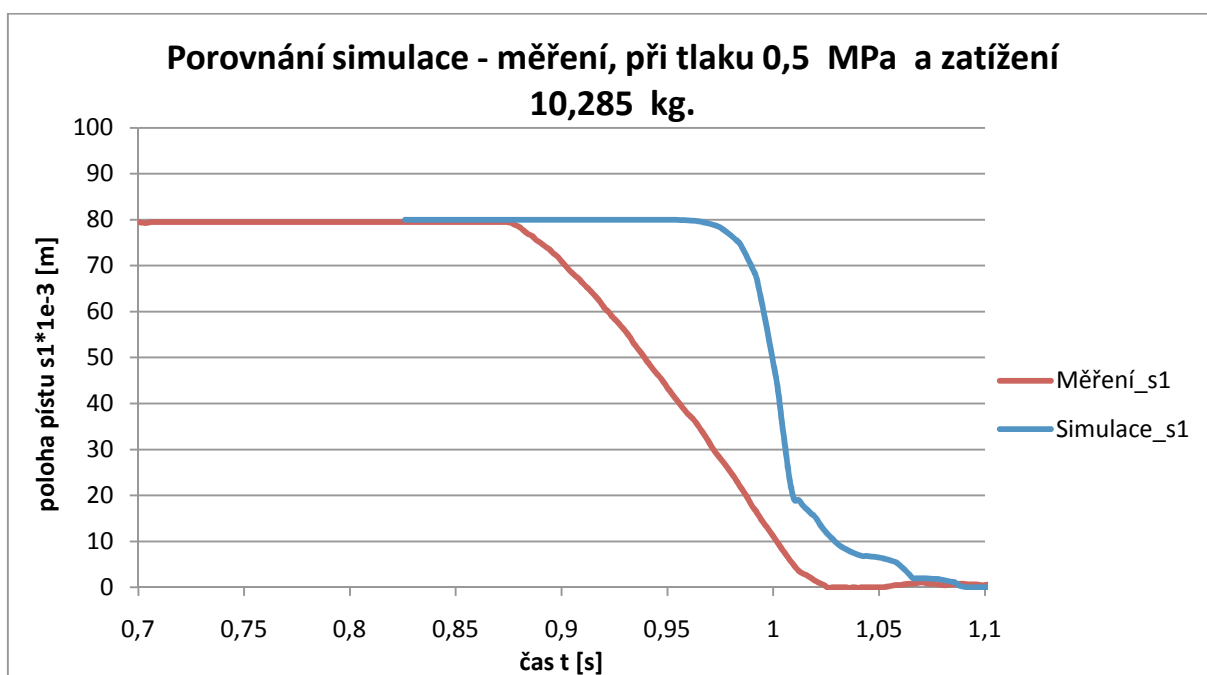
Provedeme porovnání hodnot získaných měření a simulací tlumení dojezdu pístu přímočarého pneumomotoru do koncové polohy. Názorně si porovnáme tlumení při tlaku $0,5 \text{ MPa}$ a zatížení $10,285 \text{ kg}$, další porovnání simulace s měřením při tlaku $0,5 \text{ MPa}$ a různém zatížení je obsaženo v příloze. Jak je patrné z grafu (Graf 7), průběhy tlaků jsou velmi podobné, druhá komprese vzduchu při zužování drážky je stejná, což nám ukazuje, že matematický model je vytvořen správně. U simulace však tlak p_2 nedosahuje tak vysoké hodnoty jako tlak p_2 při měření, toto by šlo odstranit lepším doladěním matematického modelu, ale měli jsme možnost experimentovat pouze na jednom vzorku pneumomotoru, tak nebylo možné přesně doladit hodnoty se simulací.



Graf 7 : porovnání tlaku před a za pístem



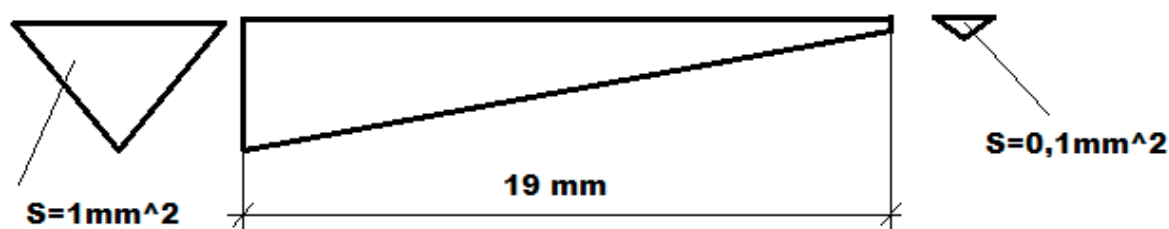
Graf 8 : porovnání rychlosti pístu



Graf 9 : porovnání polohy pístu

5.2.3 Tlumení s drážkou zužující se po celé své délce

Jak už bylo zmíněno při návrhu experimentálního zařízení v kapitole 5, dojde k další kompresi vzduchu na konci drážky, na dráze 2 mm před koncem, kde se drážka zúží na minimální otvor, kudy může vzduch odcházet. Toto zúžení je velmi důležité pro tlumení. Jak je vidět na obrázku (Obrázek 13) samočinně nastavitelného tlumení, drážky se zužují lineárně již od začátku. Zkusíme si tedy namodelovat případ, kdy se drážka zužuje lineárně po celé své délce a tak se i přiblížit tlumení samočinně nastavitelnému firmy Festo, kde se drážky také zužují lineárně po celé své délce. A porovnat hodnoty v grafech. Jedná se však jen o pokus o model zužující se drážky u samočinně nastavitelného tlumení, který jsme neměli možnost porovnat s charakteristikami samočinně nastavitelného tlumení, proto nemohla být přijata opatření pro zlepšení modelu, vyžadovalo by to měření na originálním válci.

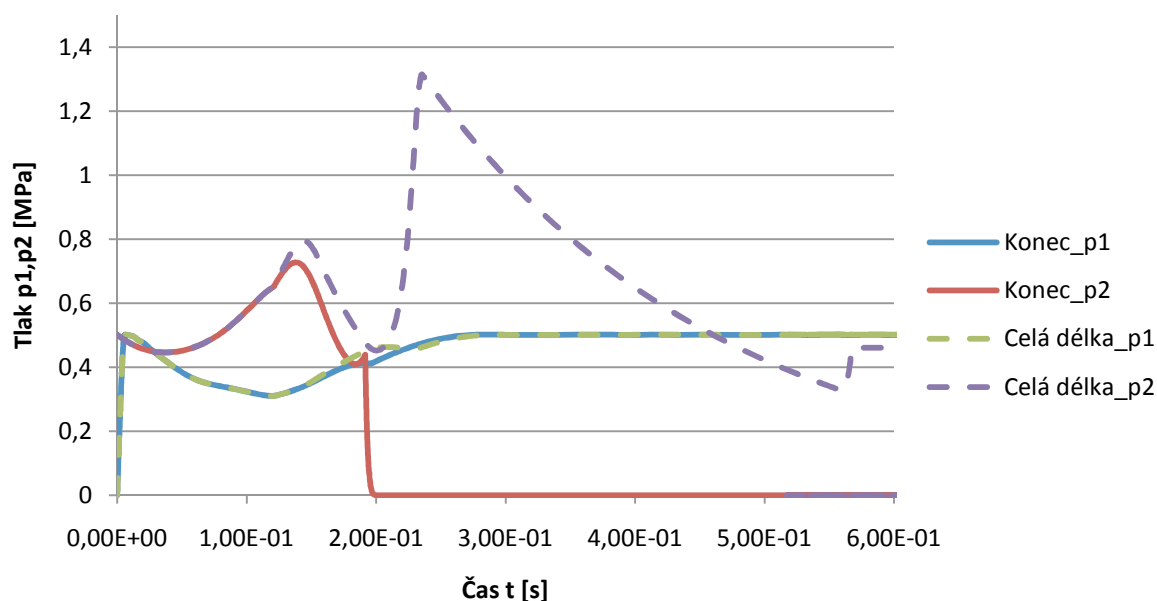


Obrázek 36 : schéma zúžení drážky

Rovnici pro zúžení si zjistíme pomocí programu Exel a zadáme jí do matematického modelu pneumomotoru (viz. Příloha).

Průběh veličin při tlumení drážkou zužující se až na konci je značen celou čarou a popiskem *Konec*. Naopak průběh veličin u tlumení drážkou zužující se po celé své délce je označen čárkovaně a popiskem *Celá délka*. Jak vidíme na grafu porovnání tlaků (Graf 10) je patrné, že změna drážky nemá vliv na tlak p_1 , který se jen mírně liší, ovšem u tlaku p_2 došlo k velké změně. U tlumení drážkou, která se zužuje po celé délce, dojde k druhé kompresi vzduchu na výrazně větší tlak.

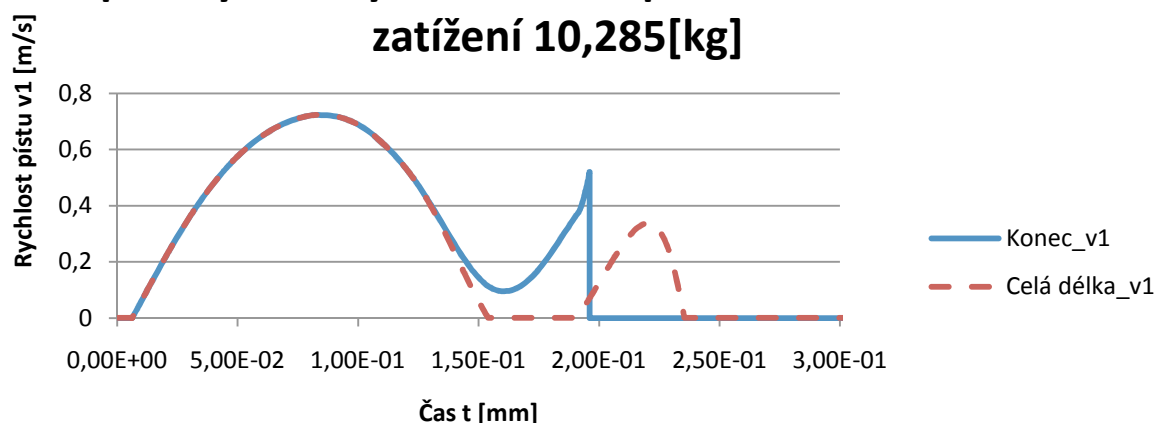
Porovnání simulace dojezdu pístu do koncové polohy s různým tlumením při tlaku 0,5 MPa a zatížení 10,285 kg.



Graf 10 : porovnání tlaků

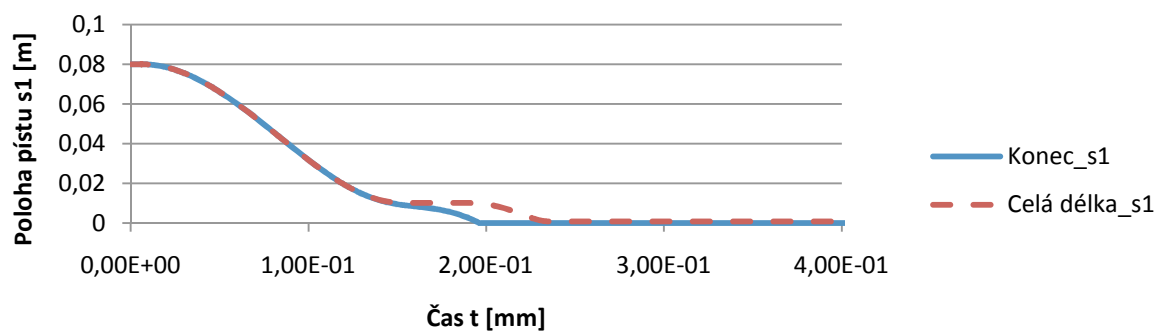
U porovnání rychlostí je viditelné, že zúžení drážky po celé délce má dobrý vliv na utlumení koncové polohy. Čas dojezdu pístu se prodlouží a píst lépe dojde do koncové polohy. Toto tvrzení si můžeme ověřit i na grafu porovnání poloh pístu (Graf 12), na kterém je dojezd do koncové polohy také lépe dotlumen drážkou zužující se po celé délce.

Porovnání simulace dojezdu pístu do koncové polohy s různým tlumením při tlaku 0,5 MPa a zatížení 10,285[kg]



Graf 11 : porovnání rychlosti pístu

Porovnání simulace dojezdu pístu do koncové polohy s různým tlumením při tlaku 0,5 MPa a zatížení 10,285 kg.



Graf 12 : porovnání poloh pístu

6. Závěr

Diplomová práce se zabývá problematikou tlumení dojezdu pístu přímočarého pneumomotoru do koncové polohy (dále už jen tlumení) včetně výpočtových vztahů, dále přehledem možných způsobů tlumení s popisem funkce a jejich výhod a nevýhod. Pro praktickou část jsme si vybrali jeden z možných způsobů tlumení a to samočinně nastavitelné tlumení firmy Festo. Vytvořili jsme si experimentální zařízení podobné tomuto tlumení, pro zjednodušení jsme oproti originálu (5 obdélníkových drážek, které se postupně zužují a jedna trojúhelníková drážka konstantního průřezu) vytvořili na tlumícím kolíku pneumomotoru pouze jednu trojúhelníkovou drážku, která se na konci zužuje. Navrhli jsme si vhodné snímače, kterými jsme snímali polohu pístu a tlaky před a za pístnicí. Snímače jsme napojili na přístroj Hydrowin 5050, který nám tyto výsledky vyhodnotil a také nám pomocí derivace dráhy zaznamenal rychlost, kterou se pohybuje píst. Provedli jsme experimentální měření při tlaku 0,4 ; 0,5 a 0,6 MPa pro zatížení pístnice hmotností 0 ; 6 ; 8,855 ; 10,285 kg, jak pro námi vytvořené samočinně nastavitelné tlumení, tak i pro klasické tlumení pomocí škrtícího ventilu. Tato měření jsem mezi sebou porovnali pomocí grafů. Z grafů bylo patrné, že námi vytvořené samočinně nastavitelné tlumení vykazovalo lepší vlastnosti, oproti tlumení pomocí škrtícího ventilu a to při průběhu tlaku v odvětrávané komoře, kde na konci tlumení dojde ještě k jedné kompresi vzduchu, která je zapříčiněna dojezdem do koncové polohy drážky, tedy k místu, kde se začne drážka zužovat. Tato komprese nám lépe dotlumí konečný dojezd pístu do koncové polohy, který byl i slyšitelně lépe dotlumen oproti tlumení škrtícím ventilem. Porovnání rychlosti a polohy pístu je poměrně velmi podobné. To si můžeme vysvětlit tvorbou zjednodušeného experimentálního zařízení. Jak je patrné z porovnání tlaků je velmi důležité zúžení drážky, v našem případě zúžení drážky je zjednodušeno a je jen na velmi malé dráze tlumení, ale i tak jde vidět velký pokrok oproti tlumení se škrtícím ventilem. Tímto jsme si dokázali lepší vlastnosti tlumení drážkou oproti tlumení škrtícím ventilem (i na takto zjednodušeném modelu). Dále jsme si vytvořili pomocí programu Matlab matematický model pneumomotoru včetně námi zjednodušeného samočinně nastavitelného tlumení a provedli simulaci tlumení při tlaku 0,5 MPa a pro hmotnostní zatížení pístnice 0 ; 6 ; 8,855 ; 10,285 kg. Napřed jsme si porovnali hodnoty ze simulace pro tlumení "drážkou" s hodnotami pneumomotoru bez tlumení, abychom si ukázali význam tlumení. U průběhu tlaku v odvětrávané komoře při tlumení dojde k druhé kompresi vzduchu stejně jako to bylo i u experimentálního měření. Správné nastavení matematického modelu je patrné i z porovnání rychlostí. Jak je možno vidět, doba zdvihu tlumeného dojezdu pístu do koncové polohy se prodlouží přibližně o 10%, tedy na konci zdvihu dojde k pozvolnějšimu dotlumení koncové

polohy. Pozitivní vliv tlumení na dojezd pístu do koncové polohy je patrný i z porovnání polohy pístu, kde tlumený pohyb je pozvolnější. Ověřili jsem si tedy správnost matematického modelu a můžeme hodnoty ze simulace porovnat z hodnotami získanými experimentálním měřením. Průběhy tlaků jsou velmi podobné, druhá komprese vzduchu při zužování drážky je stejná, což nám ukazuje že matematický model je vytvořen správně. však tlak p_2 nedosahuje tak vysoké hodnoty jako tlak p_2 při měření, toto by šlo odstranit lepším doladěním matematického modelu, ale měli jsme možnost experimentovat pouze na jednom vzorku pneumomotoru, tak nebylo možné přesně doladit hodnoty ze simulace. Jak už bylo dříve zmíněno, je velmi důležité zužování drážky a to na větší délce, proto jsme si ještě vytvořili jeden model pneumomotoru, který tlumí drážkou zužující se lineárně po celé své délce a porovnali obě tyto simulace tlumení "drážkou". Jak bylo patrné z porovnání tlaků před a za pístnicí, změna drážky nemá velký vliv na tlak v plněném prostoru, který je se jen mírně liší. Ovšem u tlaku v odvětrávaném prostoru došlo k velké změně. U tlumení "drážkou", která se zužuje po celé své délce dojde k druhé kompresi vzduchu na výrazně větší tlak. U porovnání rychlostí je viditelné, že zúžení drážky po celé délce má dobrý vliv na utlumení koncové polohy. Čas dojezdu pístu se prodlouží a píst lépe dojde do koncové polohy. Toto tvrzení si můžeme ověřit i na grafu porovnání poloh pístu na kterém je dojezd do koncové polohy také lépe dotlumen drážkou zužující se po celé délce. Když tyto informace shrneme, zjistíme že i námi zjednodušené tlumení "drážkou" lépe utlumí dojezd pístu do koncové polohy, než tlumení škrťacím ventilem. Ovšem pokud se drážka zužuje po celé své délce, tlumení vykazuje ještě lepší výsledky. Firma Festo uvádí že samočinně nastavitelné tlumení se automaticky přizpůsobuje změnám zátěže. Toto tvrzení je patrné i z našeho měření na zjednodušeném modelu při porovnání grafů experimentálního měření pro různé hmotnostní zatížení pístnice pohlcuje tlumení kinetickou energii stejně.

7. Seznam použité literatury

- [1] BACKÉ, W.; ESHMANN, R.: A Simulation Program for Pneumatics. In *Proceedings of the Conference Sixth Bath International Fluid Power Workshop*. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [2] BEATER, P. Pneumatic drives: system design, modelling and control[i]. Berlin: Springer, 2007. 323 pp. ISBN 978-3-540-69470-0
- [3] DVOŘÁK, L. *Metodika návrhu, simulace a experimentální ověření pneumatických systémů*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. 104 s. Vedoucí disertační práce KOPÁČEK, J.
- [4] Festo AG & Co. KG. *Festo.cz* [online]. 2010 [cit. 2011-03-26]. Varianty tlumení P/PPV/PPS. Dostupné z WWW: <http://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_cs/ANM/CZ/DSNU/INDEX.HTM>.
- [5] Festo AG & Co. KG. *Festo.cz* [online]. 2006 [cit. 2011-03-26]. DGSL. Dostupné z WWW: <http://www.festo.com/animationen/dgsl_en/>.
- [6] FOJTÁŠEK, Kamil. *Porovnání dvou způsobů modelování pneumatických mechanismů*. Ostrava, 2009. 53 s. Diplomová práce. VŠB-TU Ostrava.
- [7] Freudenberg and NOK Group. *SIMRIT.CZ* [online]. 2011 [cit. 2011-03-26]. Dampandseal. Dostupné z WWW: < <http://www.simrit.cz/web/public/products/productnews/dampandseal>>.
- [8] KOLEKTIV AUTORŮ. SMC Training – Stlačený vzduch a jeho využití [i]. Brno: SMC Industrial Automation CZ s.r.o. 2. vydání. 344 s.
- [9] KOPÁČEK, J. Pneumatické mechanismy Díl I. Pneumatické prvky a systémy. Skriptum VŠB-TU Ostrava 1996.
- [10] KOPÁČEK, J.: Pneumatické mechanismy, díl II. - Řízení pneumatických systémů. Skripta VŠB-TU, Ostrava, 1997.
- [11] KOPÁČEK, J.: Pneumatické mechanismy. Česká strojnická společnost, Dům techniky Ostrava, 1998.
- [12] MOROZOV, A. I. Vybór srjedstv tormožženija avtomatičjeskogo pnjevmoprivoda. In [i]Mechanizacija i avtomatizacija proizvodstva[i]. Moskva : Gosudarstvennoje naučno-techničeskoje izdatel'stvo mašinostroitel'noj literatury, č. 9/73 ISSN 0025-8873
- [13] NEVRLÝ, J. Modelování pneumatických systémů[i]. Brno: Akademické nakladatelství CERM Brno, 2003. 180 s. 1. vydání. ISBN 80-7204-300-5

[14] NEVRLÝ, J.: Úvod do modelování pneumatických mechanismů. Česká strojnická společnost, Ústřední odborná sekce Hydraulika a pneumatika, Praha, 2003, ISNB 80-02-01549-5.

[15] Pavlok, B., Hružík, L., Bova, M., Kopáček, J., Žáček, M.: Hydraulika a pneumatika, VŠB-TU Ostrava, 2007.

[16] PŘÍMOČARÉ PNEUMOMOTORY. *Svět vzdělání*. 2010, 3, s. 1-4. Dostupný také z WWW: <www.svetvzdelavani.cz/sts/images/stories/Pneumomotory_3.doc>.

[17] Siłowniki pneumatyczne. *Pneumatyka*. 2009, 2, s. 9-11. ISSN 1426-6644.

Firemní literatura:

Pneumax, Bosch, Festo, SMC, Simrit

8. Přílohy

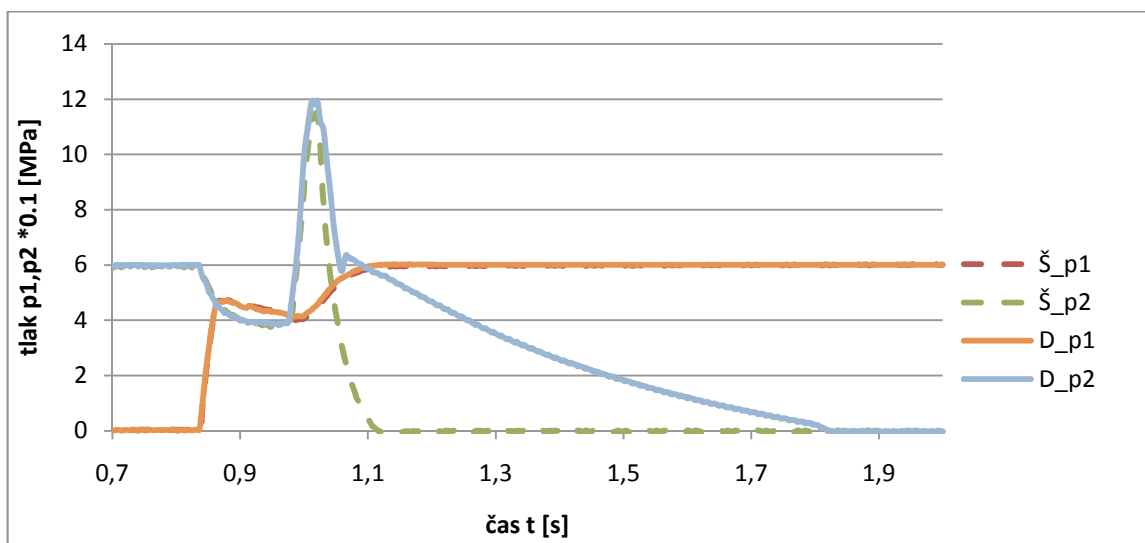
Přílohy diplomové práce

V příloze je obsaženo :

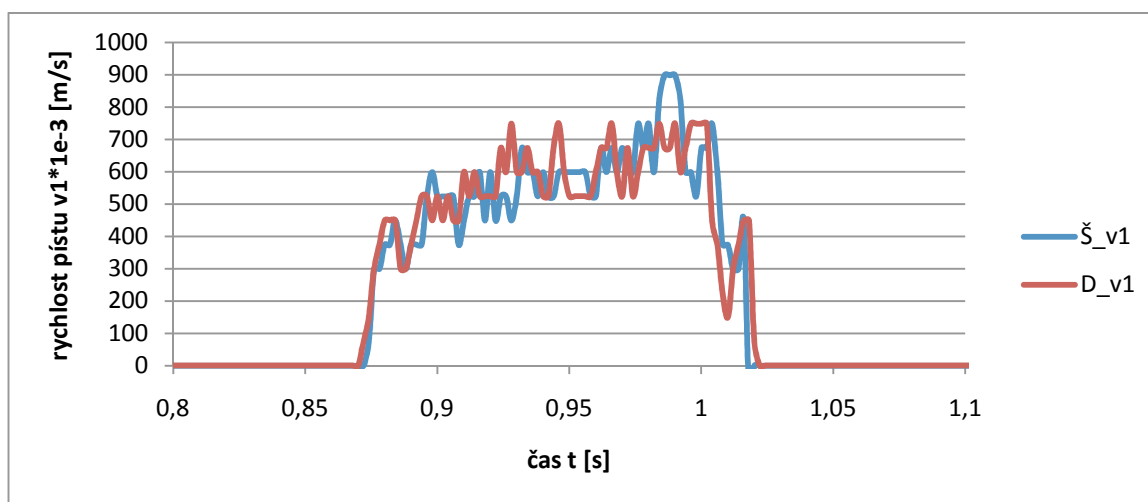
1. Grafy z experimentálního měření : porovnání tlumení drážkou a škrtícím ventilem	1
2. Zjednodušený 3D model experimentálního zařízení	13
3. Tvorba matematického modelu pneumomotoru	16
4. Porovnání simulace a experimentálního měření tlumení dojezdu pístu do koncové polohy	19
5. Tvorba modelu z drážkou zužující se po celé délce	25

1. Grafy z experimentálního měření : porovnání tlumení drážkou a škrťacím ventilem.

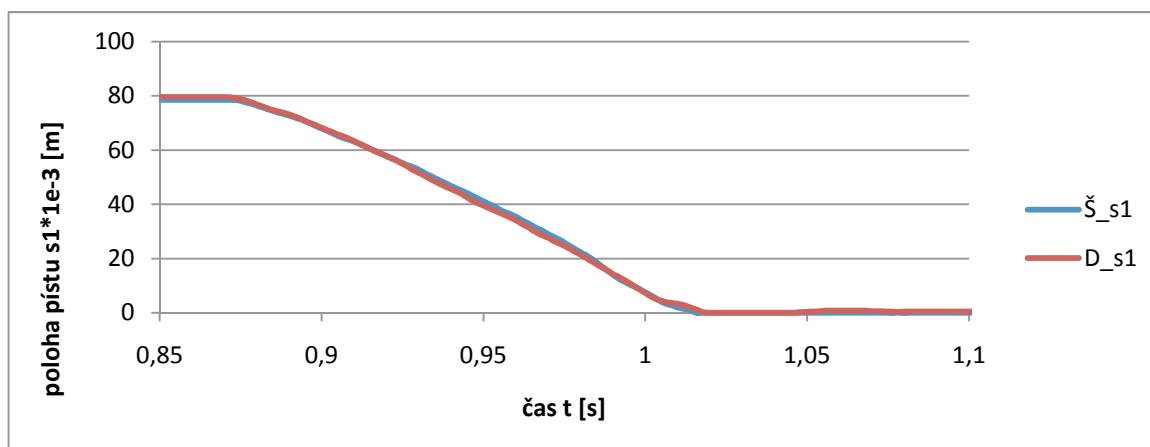
Porovnání tlumení škrťacím ventilem a drážkou při tlaku 0,6 MPa a zatížení 10,285 kg.



Graf 1 : porovnání tlaků před a za pístem při různém tlumení

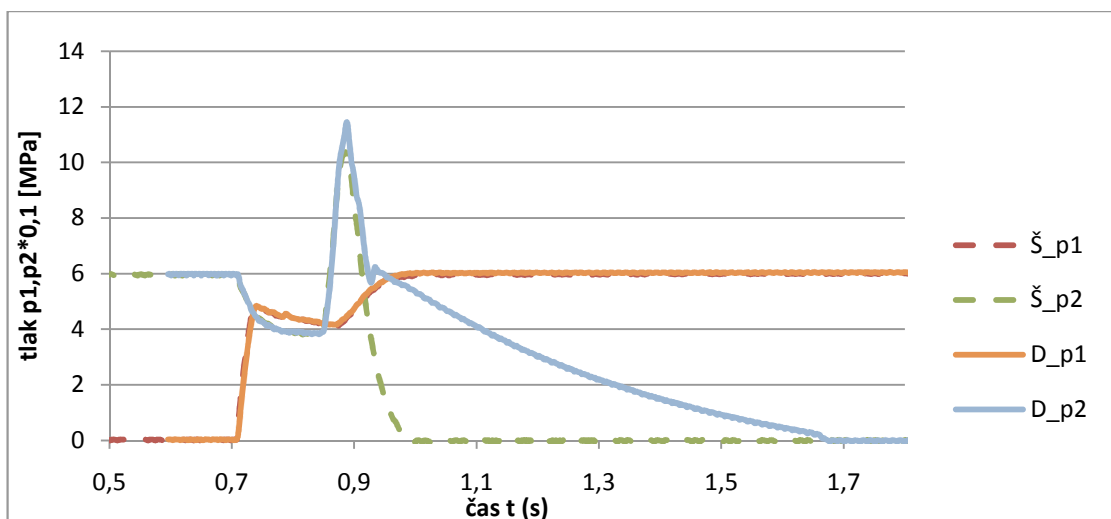


Graf 2 : porovnání rychlosti pístu při různém tlumení

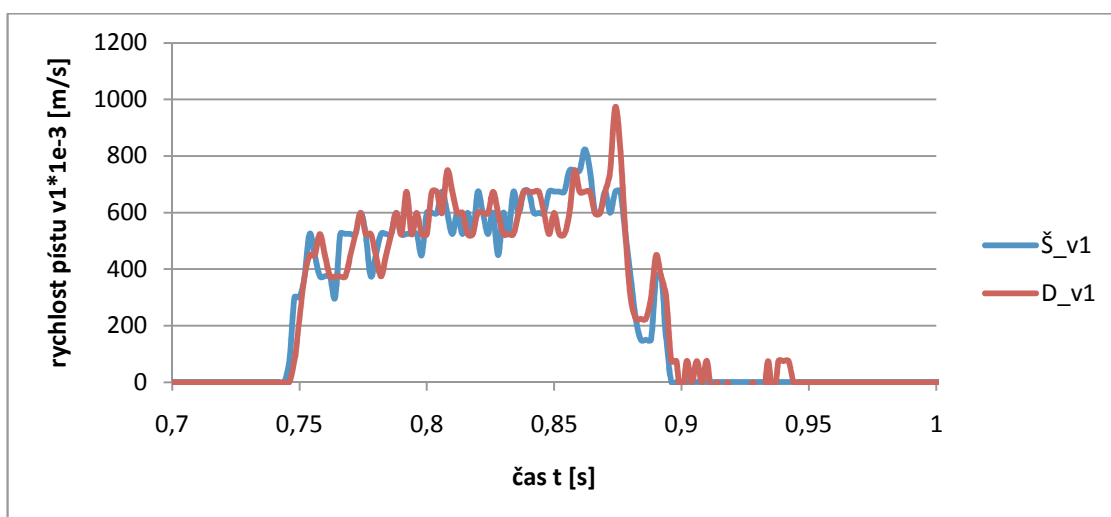


Graf 3 : porovnání polohy pístu při různém tlumení

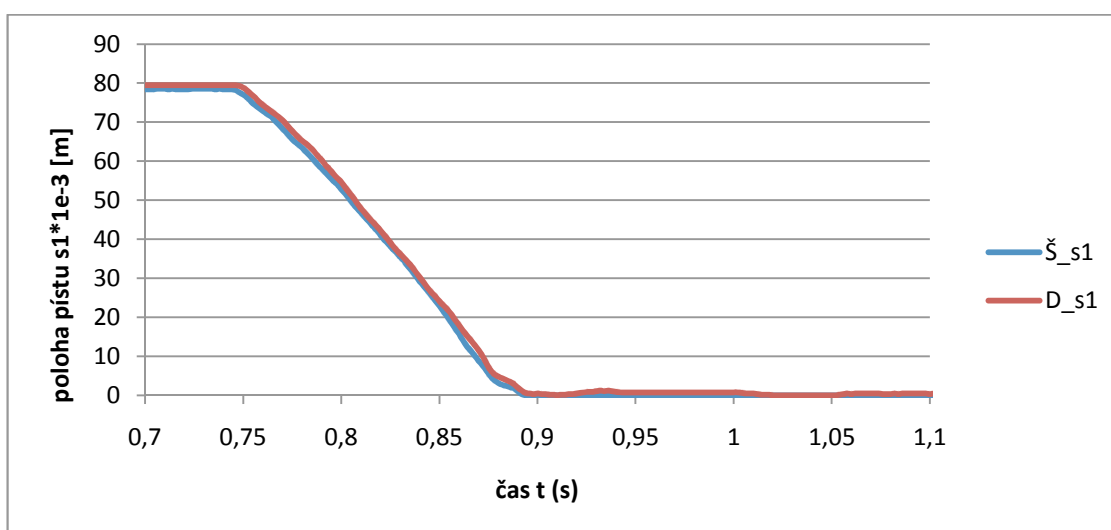
Porovnání tlumení škrtícím ventilem a drážkou při tlaku 0,6 MPa a zatížení 8,855 kg.



Graf 4 : porovnání tlaků před a za pístem při různém tlumení

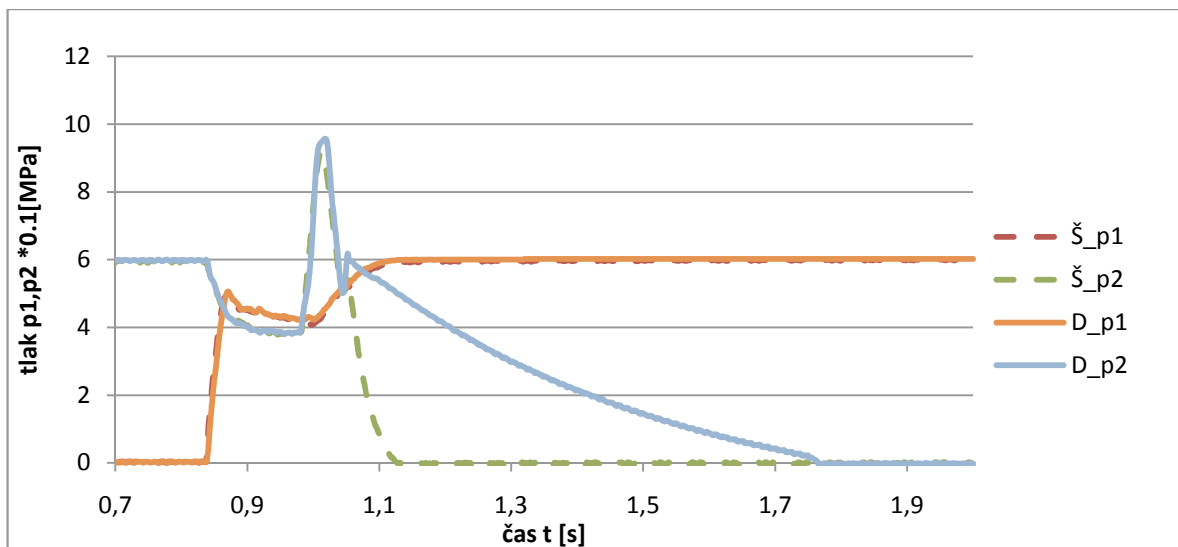


Graf 5 : porovnání rychlosti pístu při různém tlumení

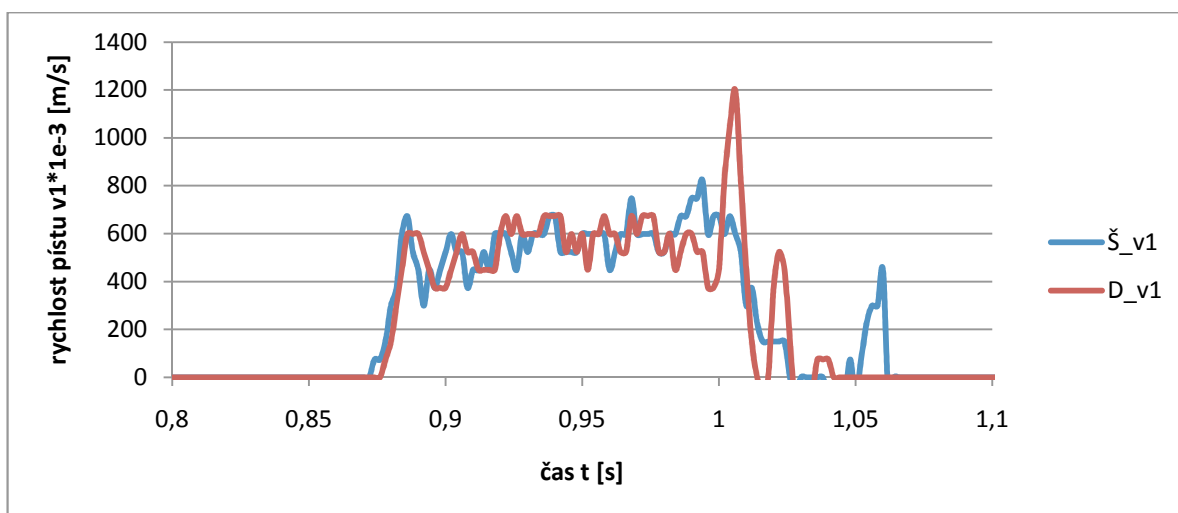


Graf 6 : porovnání polohy pístu při různém tlumení

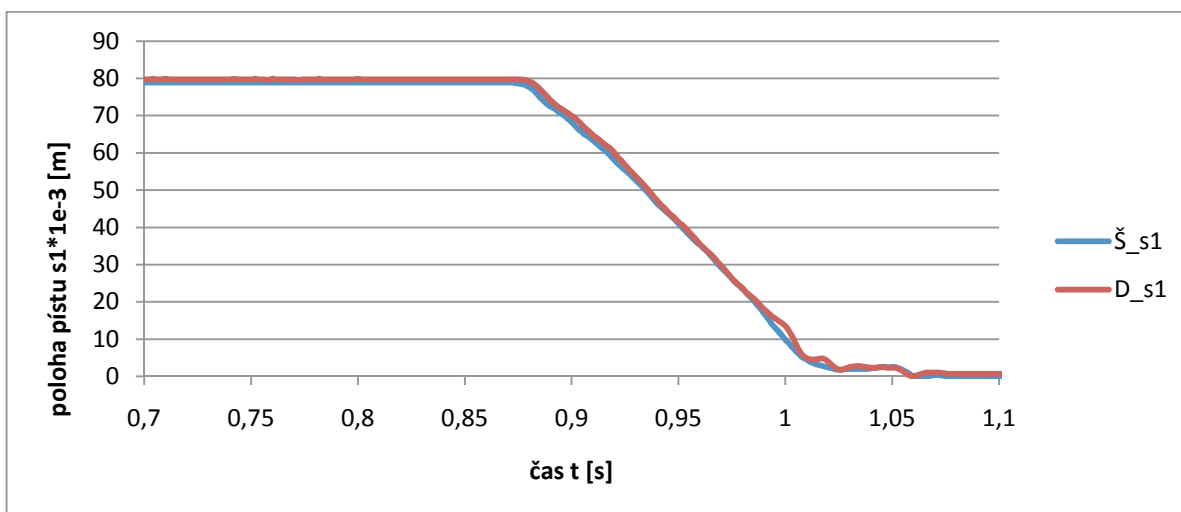
Porovnání tlumení škrtícím ventilem a drážkou při tlaku 0,6 MPa a zatížení 6 kg.



Graf 7 : porovnání tlaků před a za pístem při různém tlumení

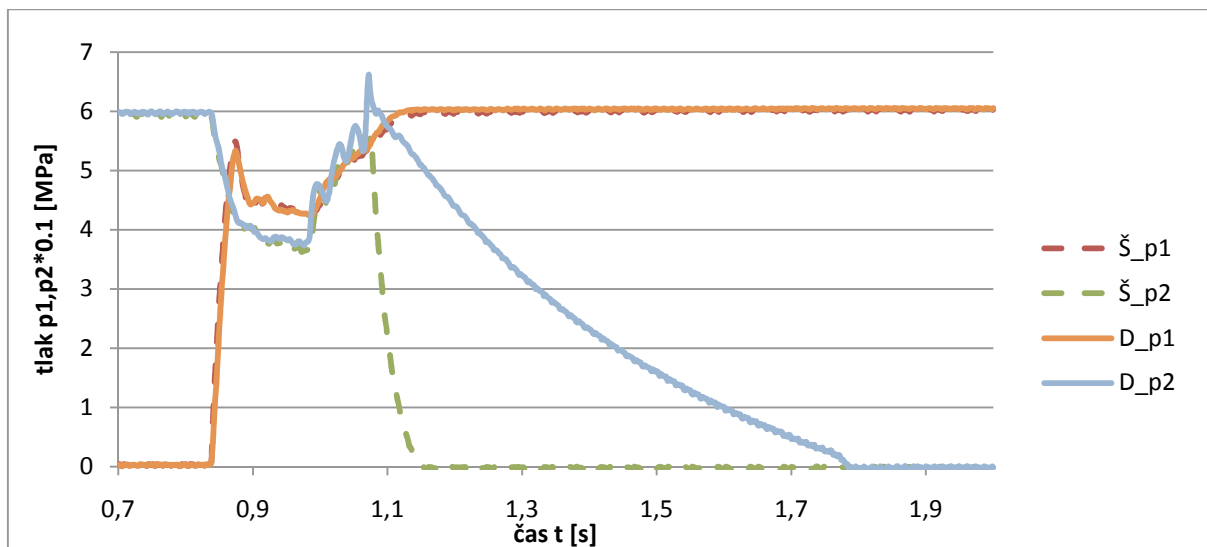


Graf 8 : porovnání rychlosti pístu při různém tlumení

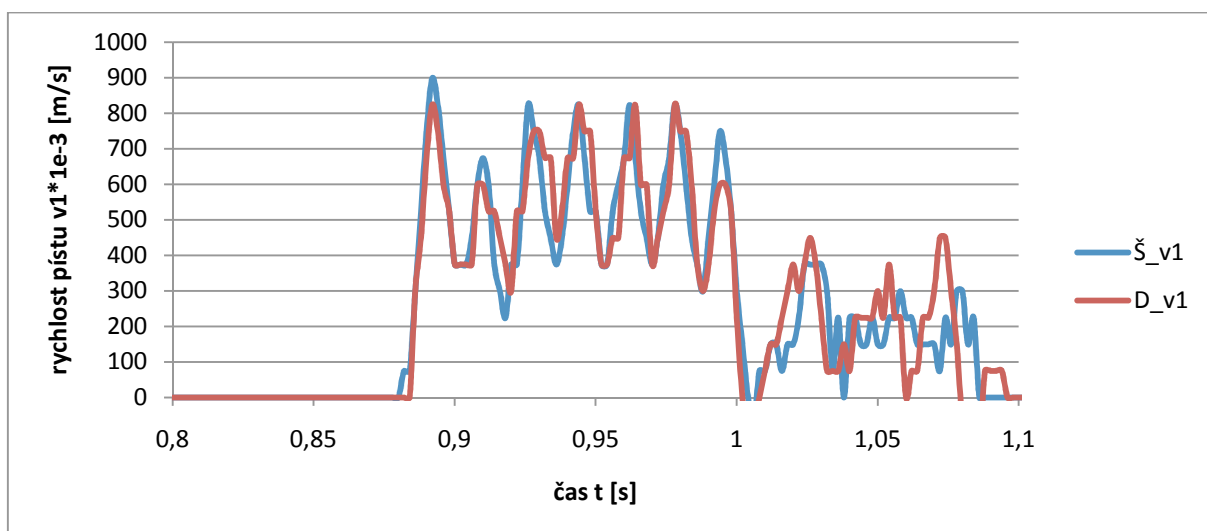


Graf 9 : porovnání polohy pístu při různém tlumení

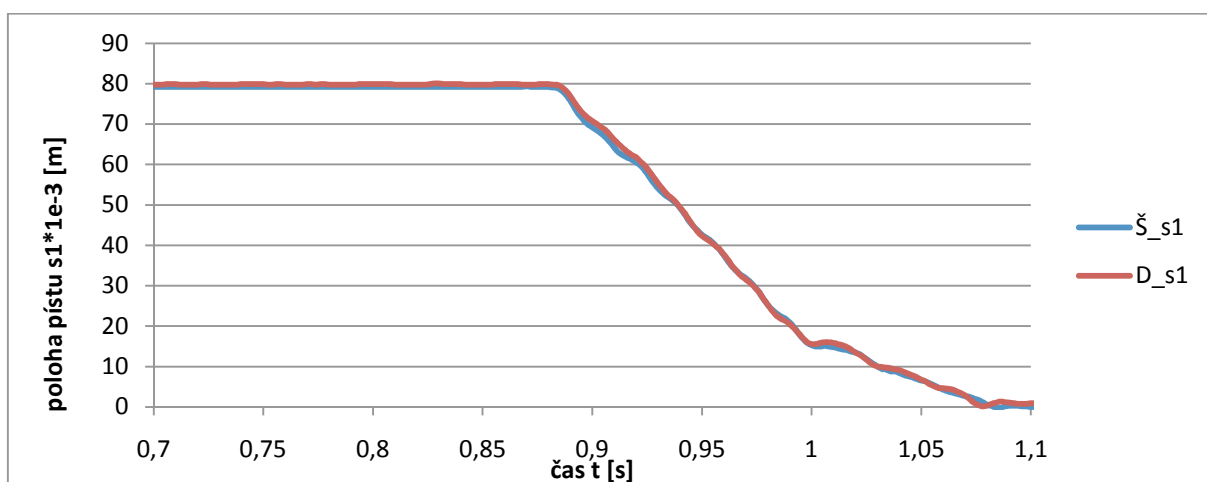
Porovnání tlumení škrtícím ventilem a drážkou při tlaku 0,6 MPa a zatížení 0 kg.



Graf 10 : porovnání tlaků před a za pístem při různém tlumení

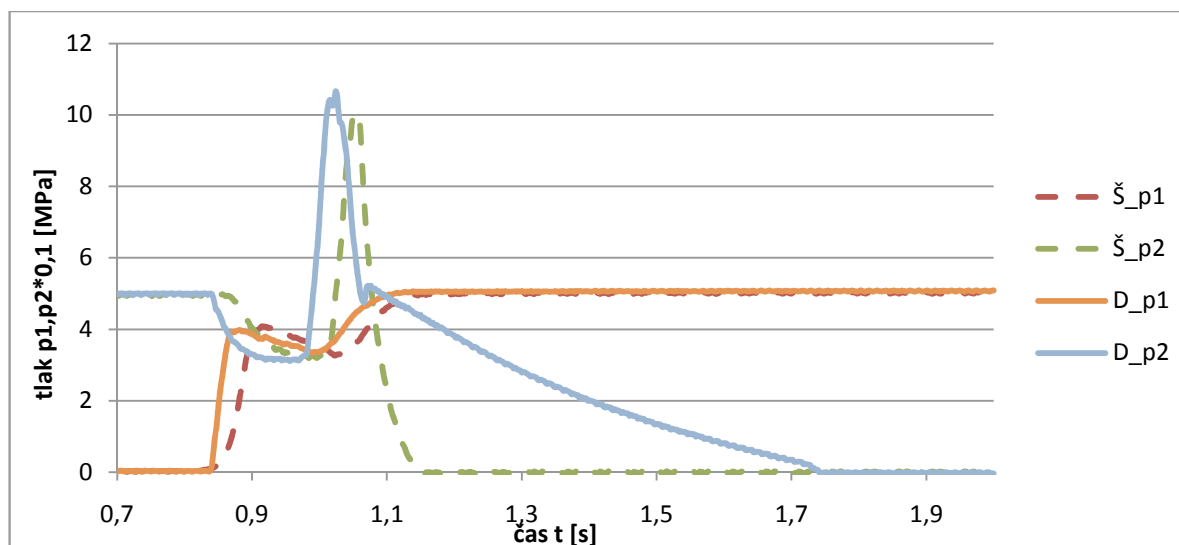


Graf 11 : porovnání rychlosti pístu při různém tlumení

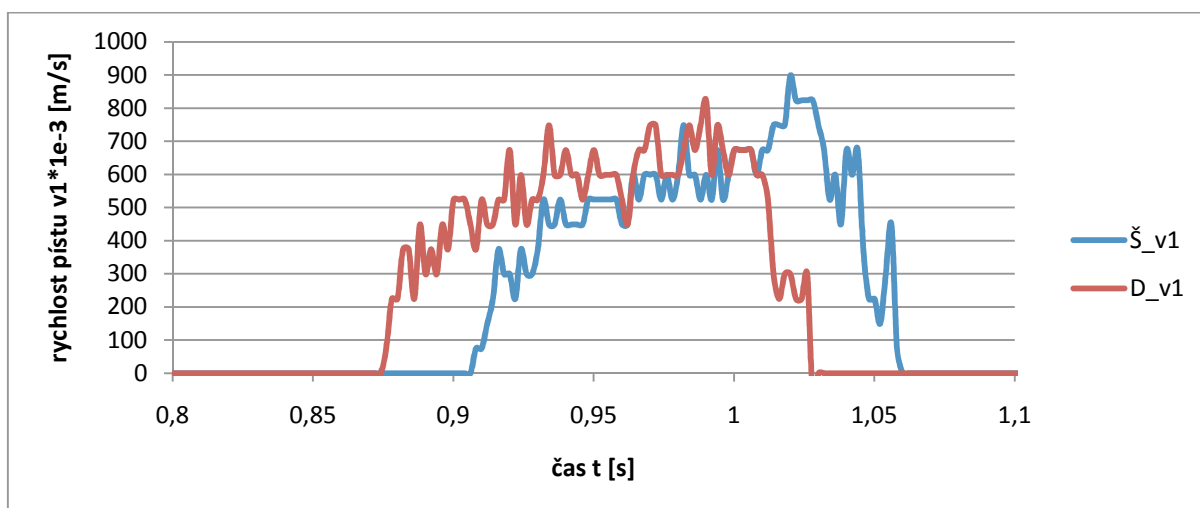


Graf 12 : porovnání polohy pístu při různém tlumení

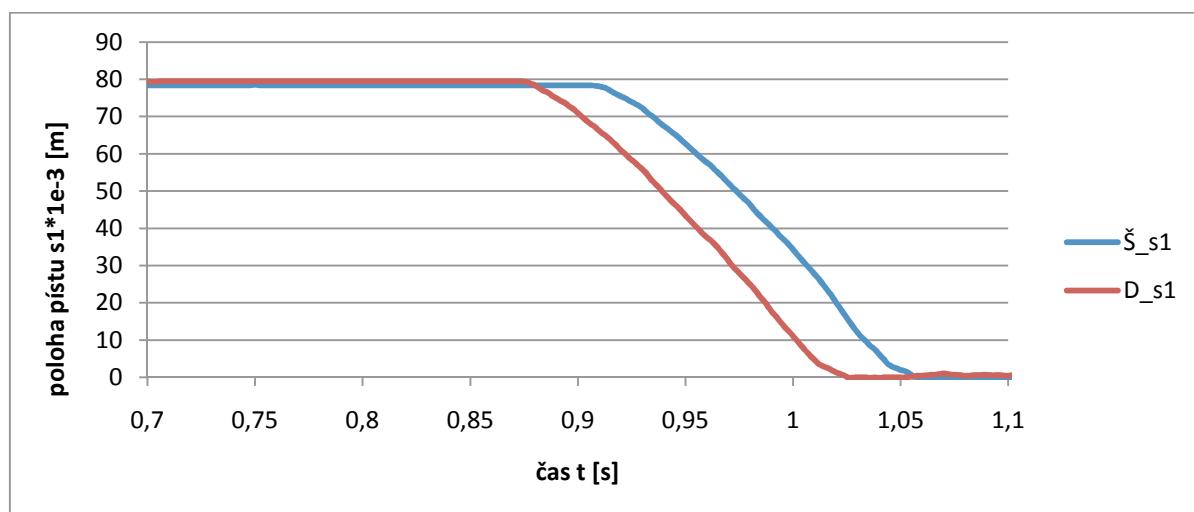
Porovnání tlumení škrtícím ventilem a drážkou při tlaku 0,5 MPa a zatížení 10,285 kg.



Graf 13 : porovnání tlaků před a za pístem při různém tlumení

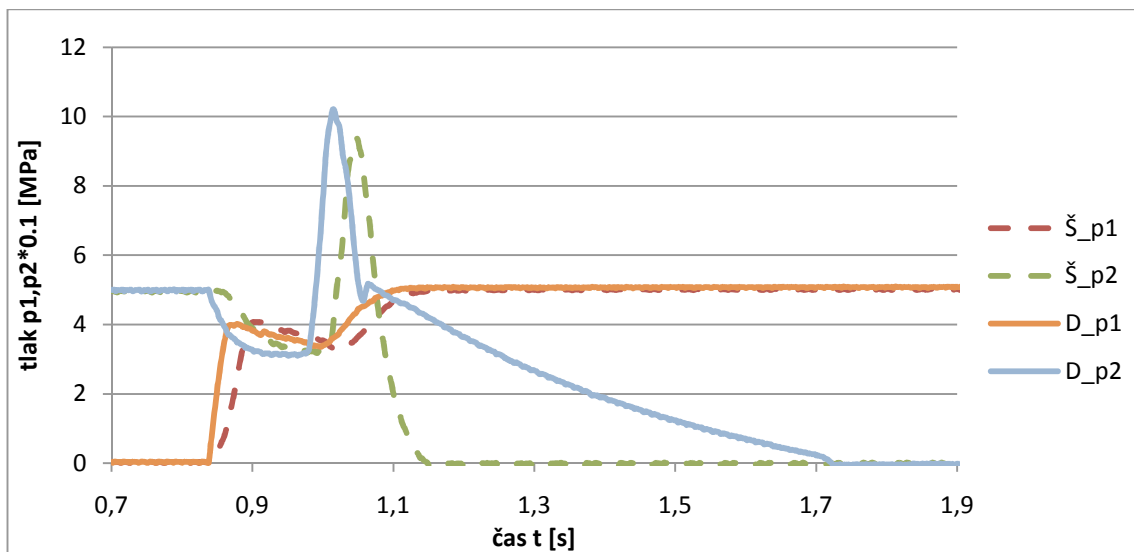


Graf 14 : porovnání rychlosti pístu při různém tlumení

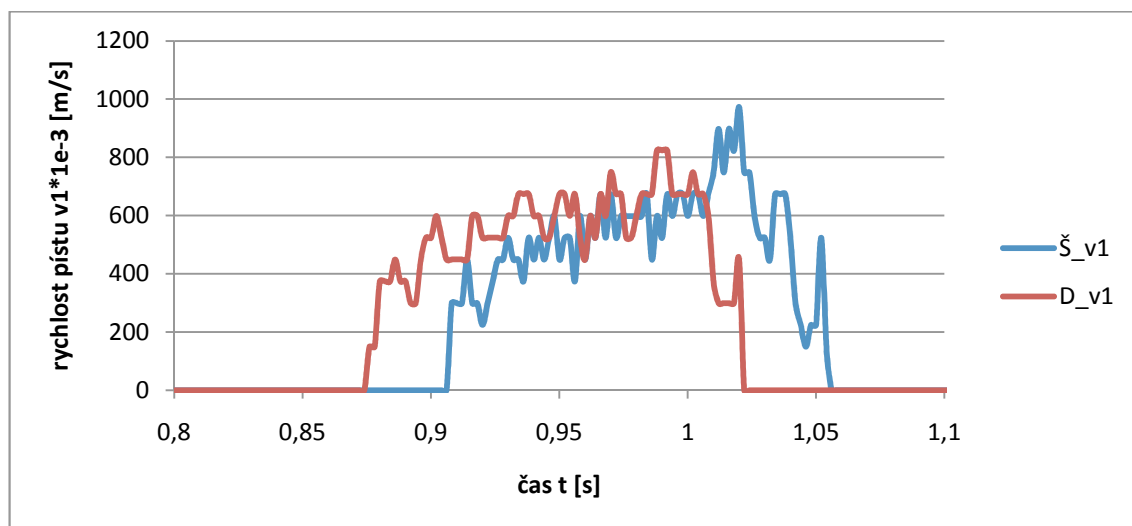


Graf 15 : porovnání polohy pístu při různém tlumení

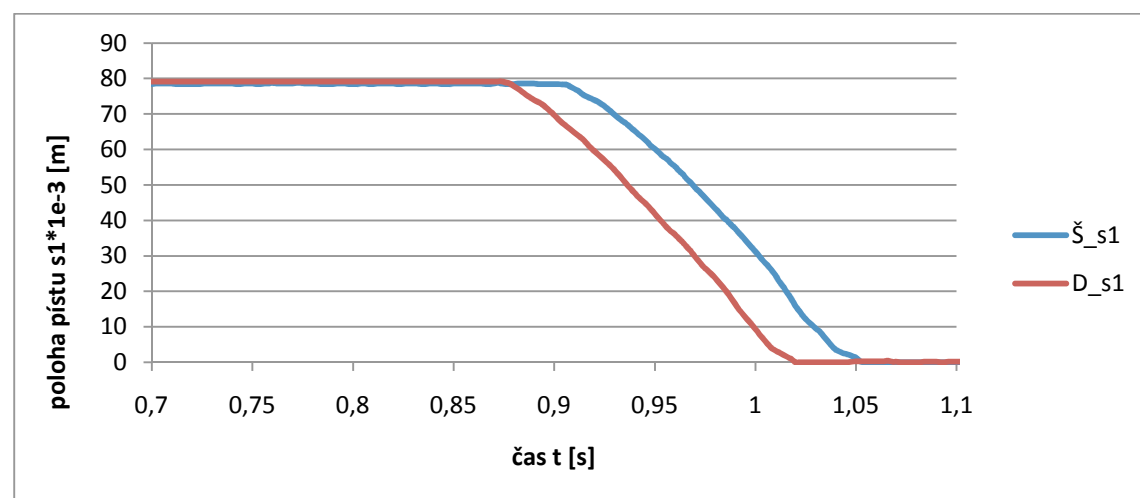
Porovnání tlumení škrticím ventilem a drážkou při tlaku 0,5 MPa a zatížení 8,855 kg.



Graf 16 : porovnání tlaků před a za pístem při různém tlumení

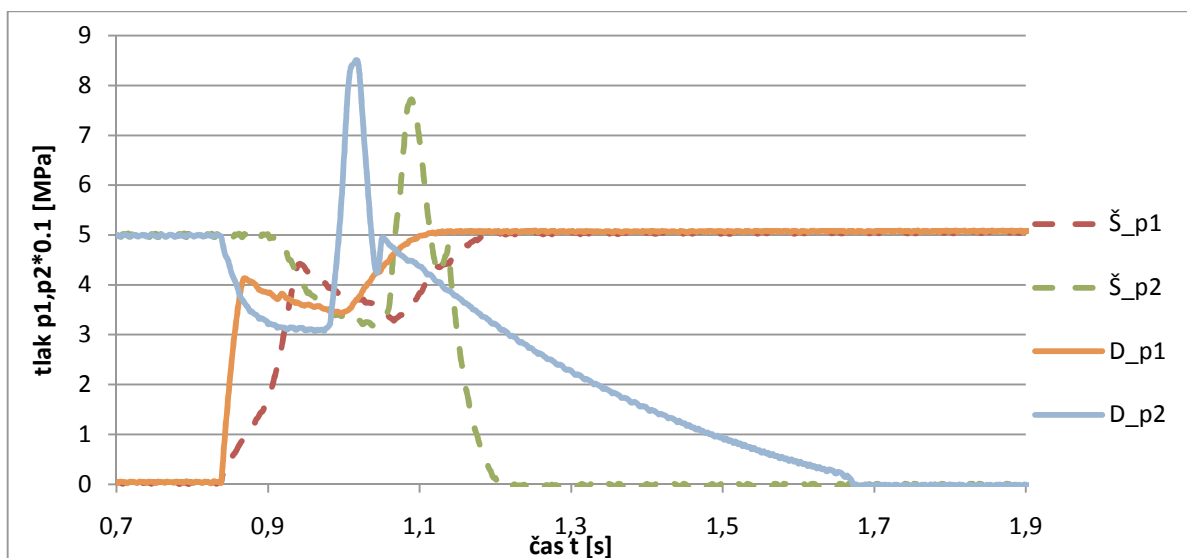


Graf 17 : porovnání rychlosti pístu při různém tlumení

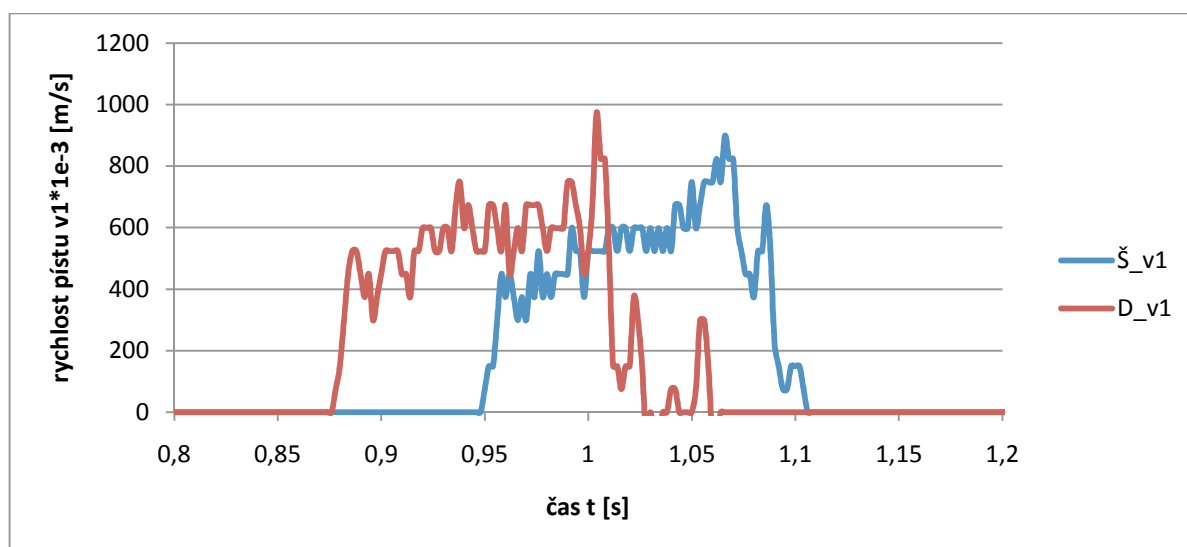


Graf 18 : porovnání polohy pístu při různém tlumení

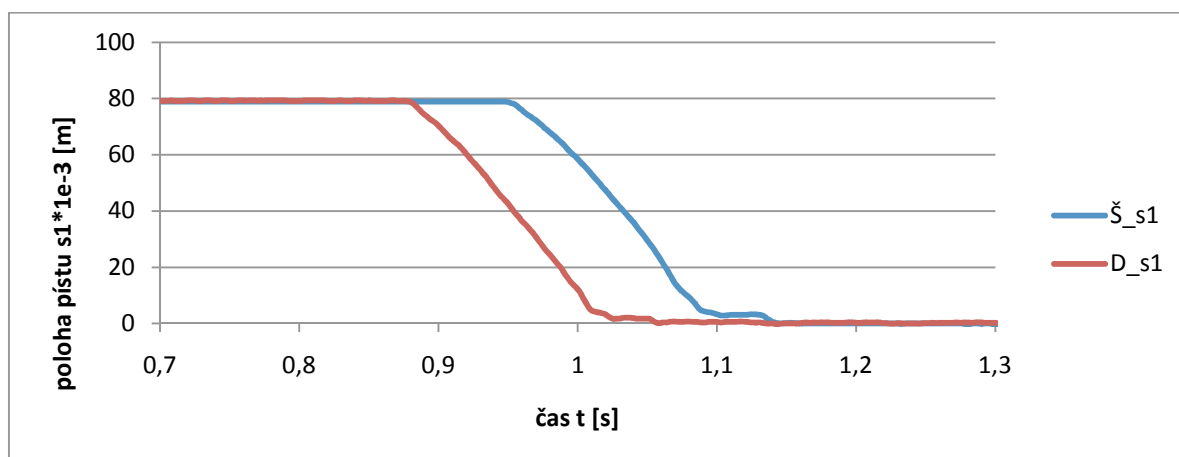
Porovnání tlumení škrtícím ventilem a drážkou při tlaku 0,5 MPa a zatížení 6 kg.



Graf 19 : porovnání tlaků před a za pístem při různém tlumení

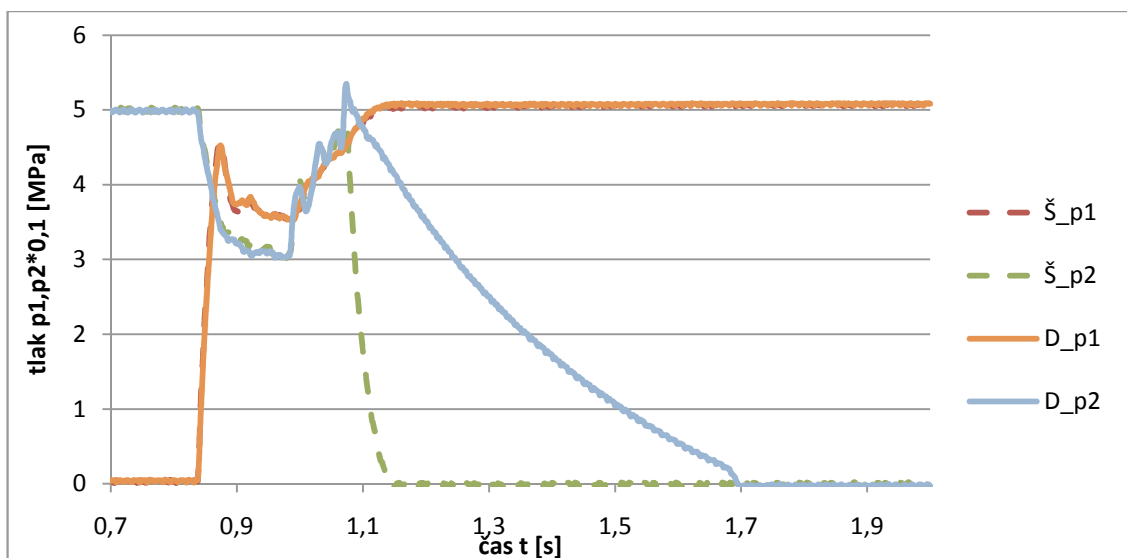


Graf 20 : porovnání rychlosti pístu při různém tlumení

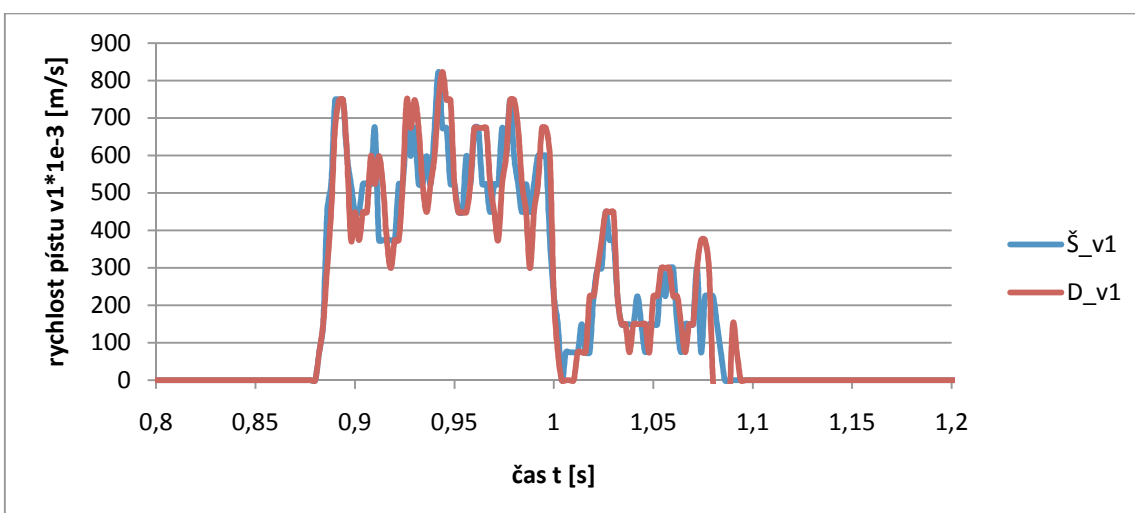


Graf 21 : porovnání polohy pístu při různém tlumení

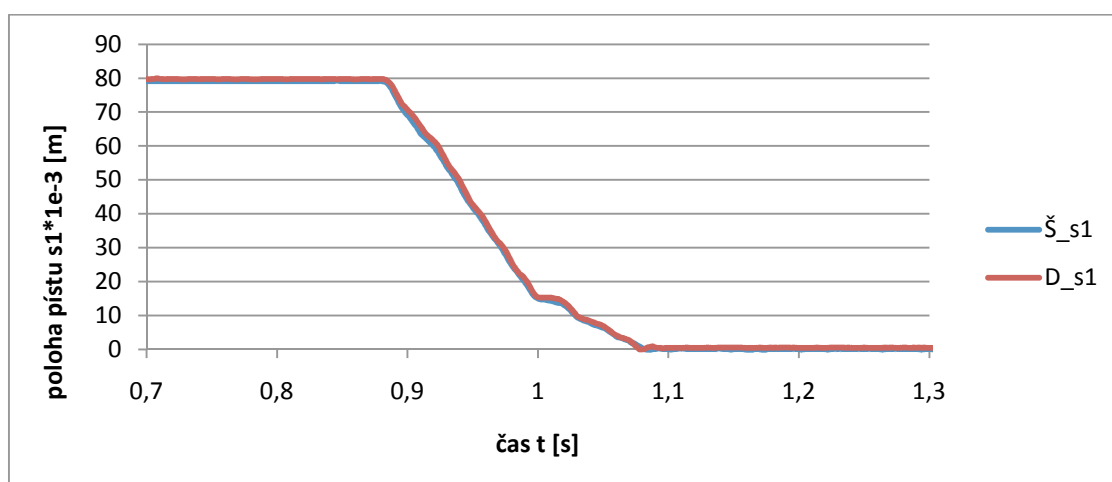
Porovnání tlumení škrtcím ventilem a drážkou při tlaku 0,5 MPa a zatížení 0 kg.



Graf 22 : porovnání tlaků před a za pístem při různém tlumení

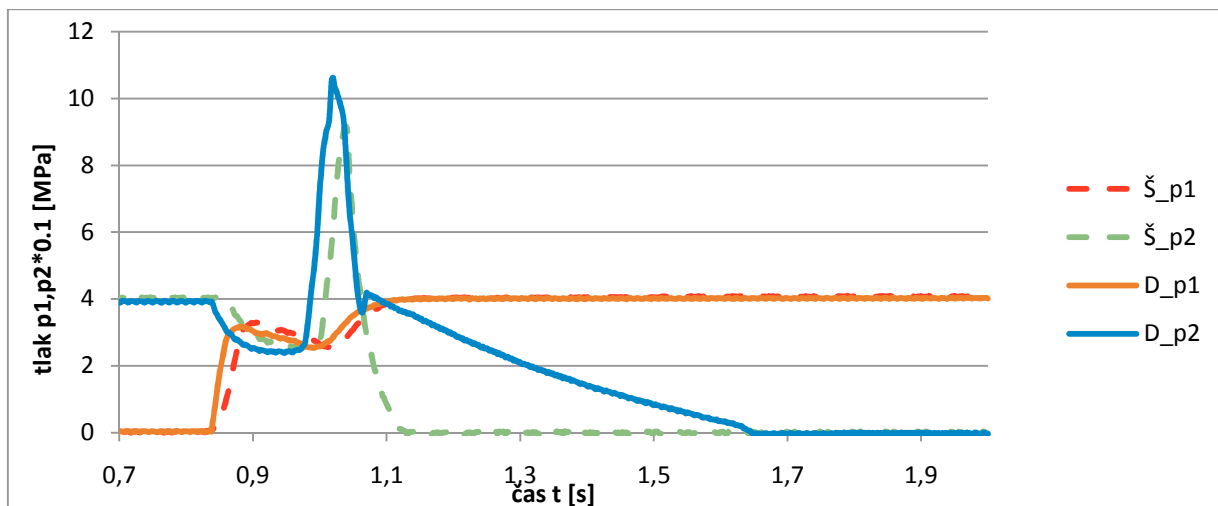


Graf 23 : porovnání rychlosti pístu při různém tlumení

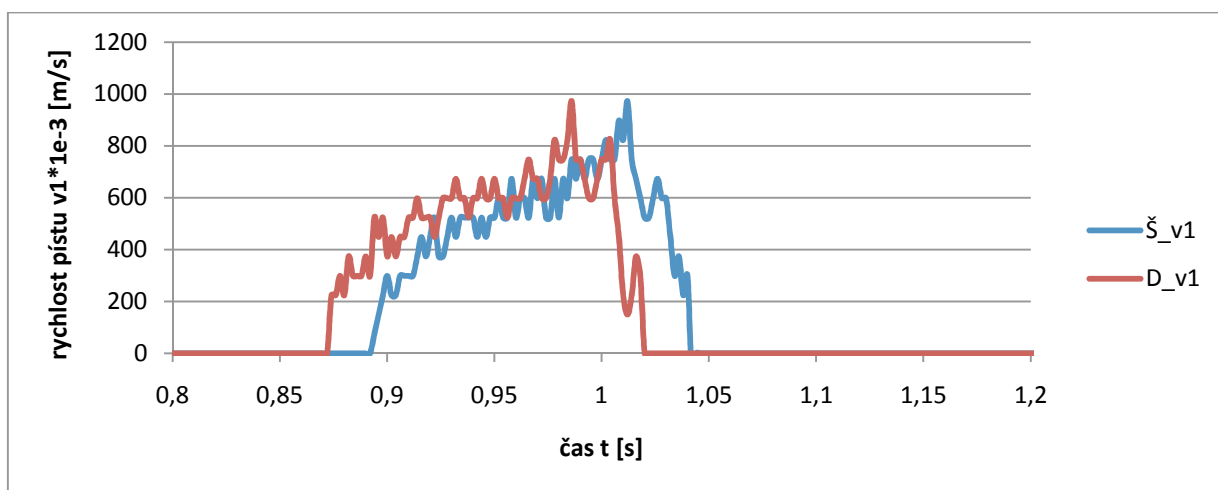


Graf 24 : porovnání polohy pístu při různém tlumení

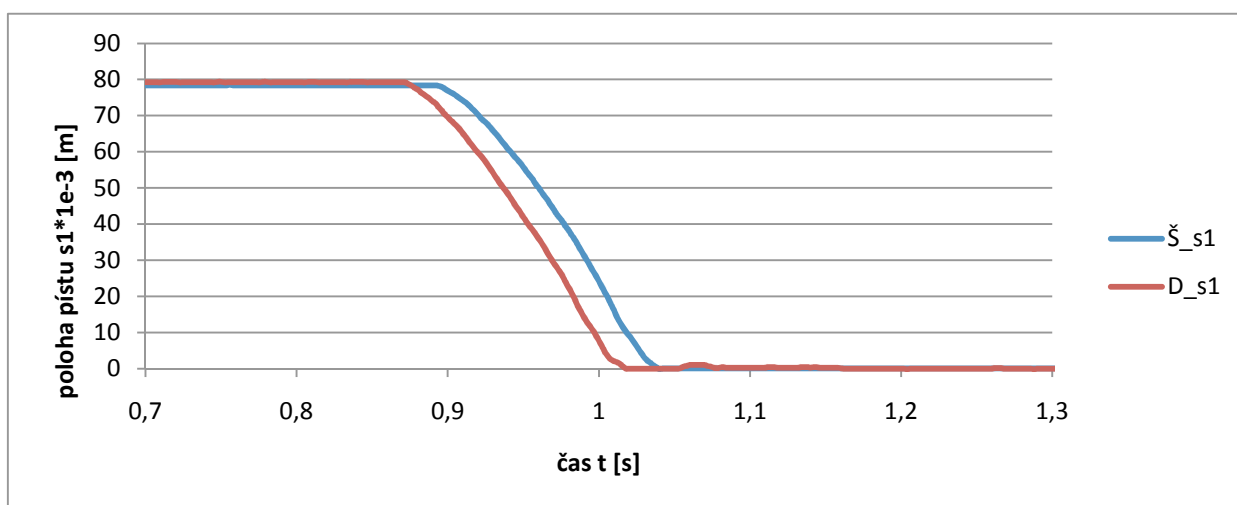
Porovnání tlumení škrtícím ventilem a drážkou při tlaku 0,4 MPa a zatížení 10,285 kg.



Graf 25 : porovnání tlaků před a za pístem při různém tlumení

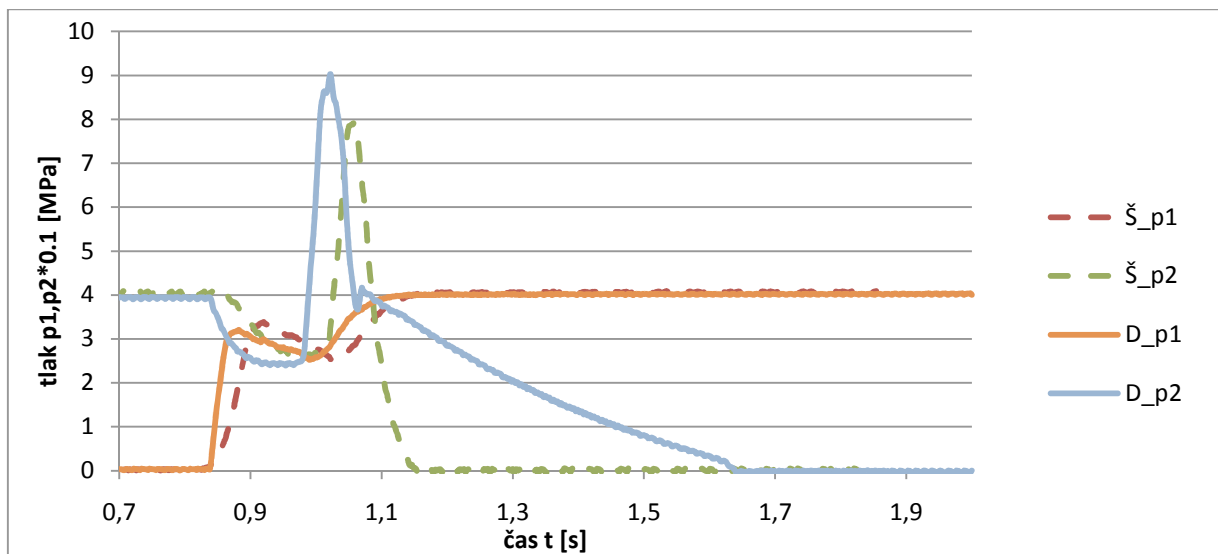


Graf 37 : porovnání rychlosti pístu při různém tlumení

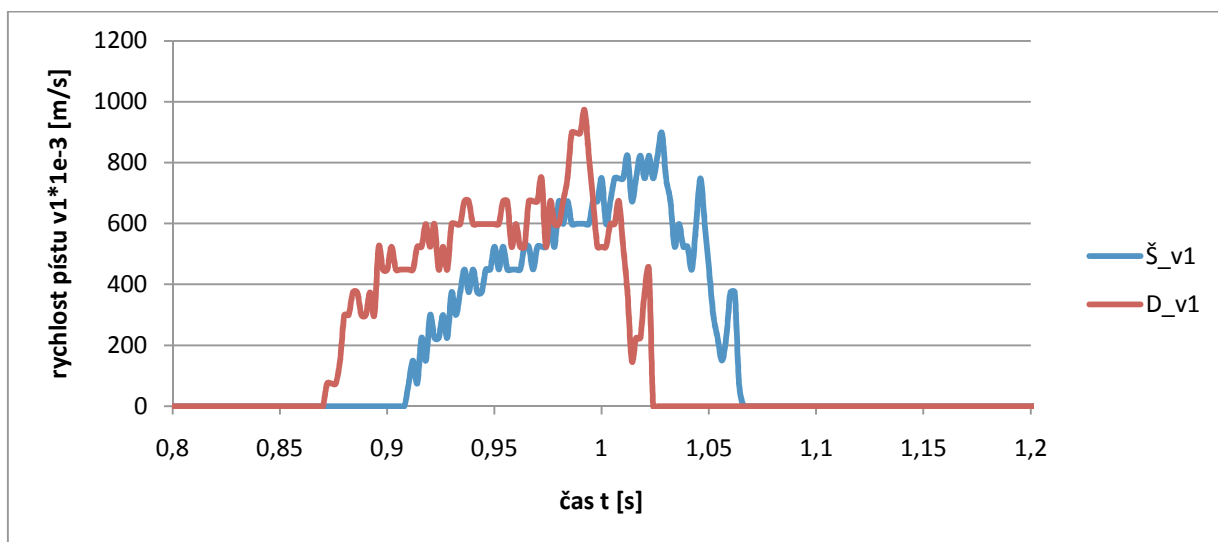


Graf 27 : porovnání polohy pístu při různém tlumení

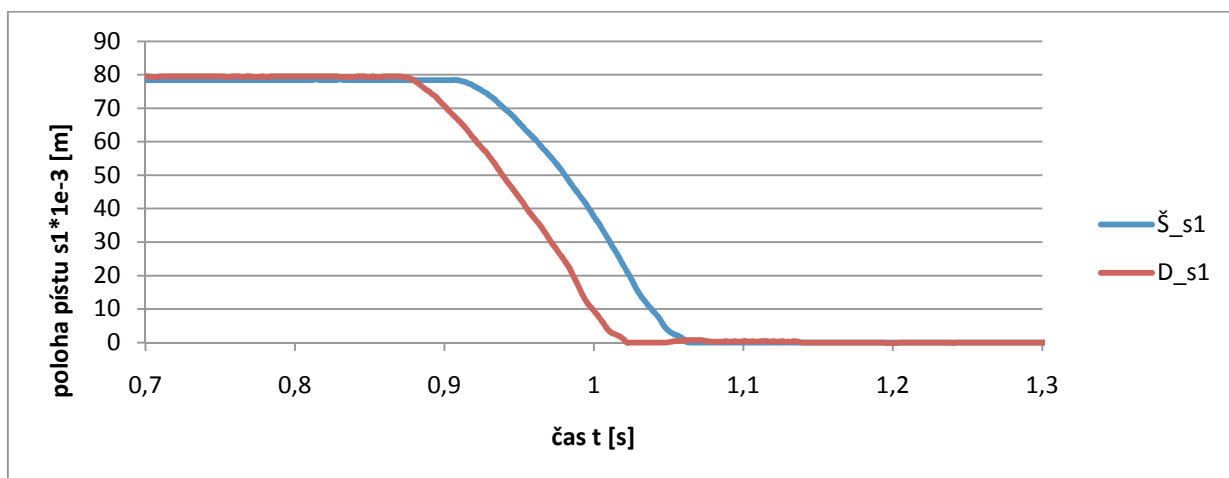
Porovnání tlumení škrticím ventilem a drážkou při tlaku 0,4 MPa a zatížení 8,855 kg.



Graf 28 : porovnání tlaků před a za pístem při různém tlumení

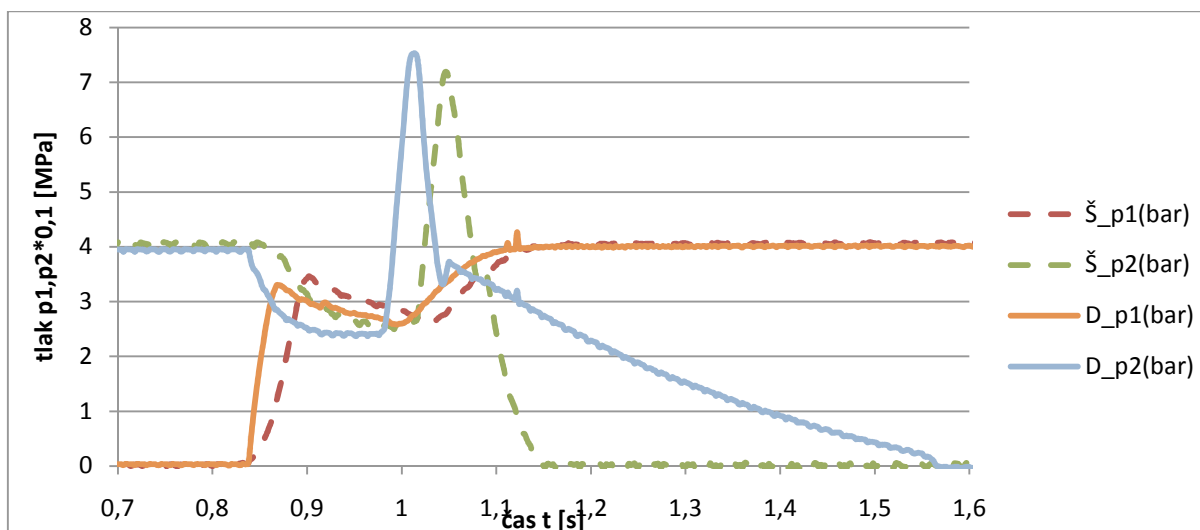


Graf 29 : porovnání rychlosti pístu při různém tlumení

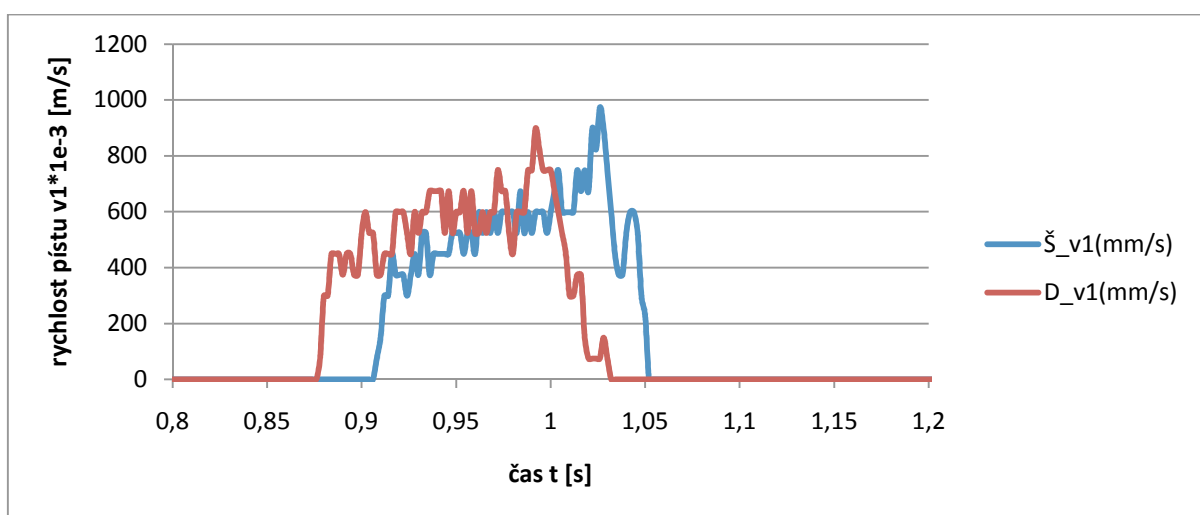


Graf 30 : porovnání polohy pístu při různém tlumení

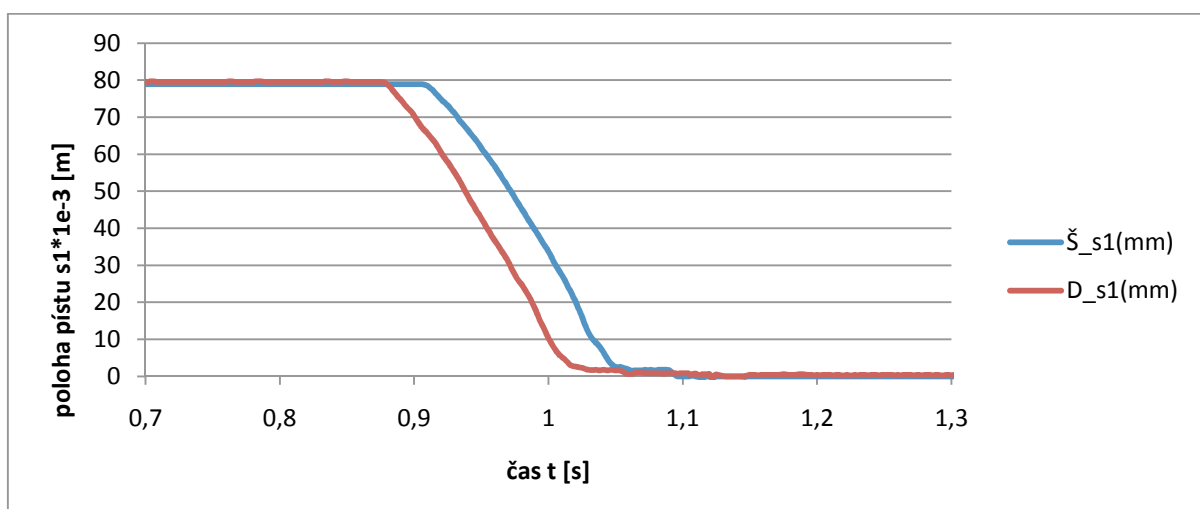
Porovnání tlumení škrtícím ventilem a drážkou při tlaku 0,4 MPa a zatížení 6 kg.



Graf 31 : porovnání tlaků před a za pístem při různém tlumení

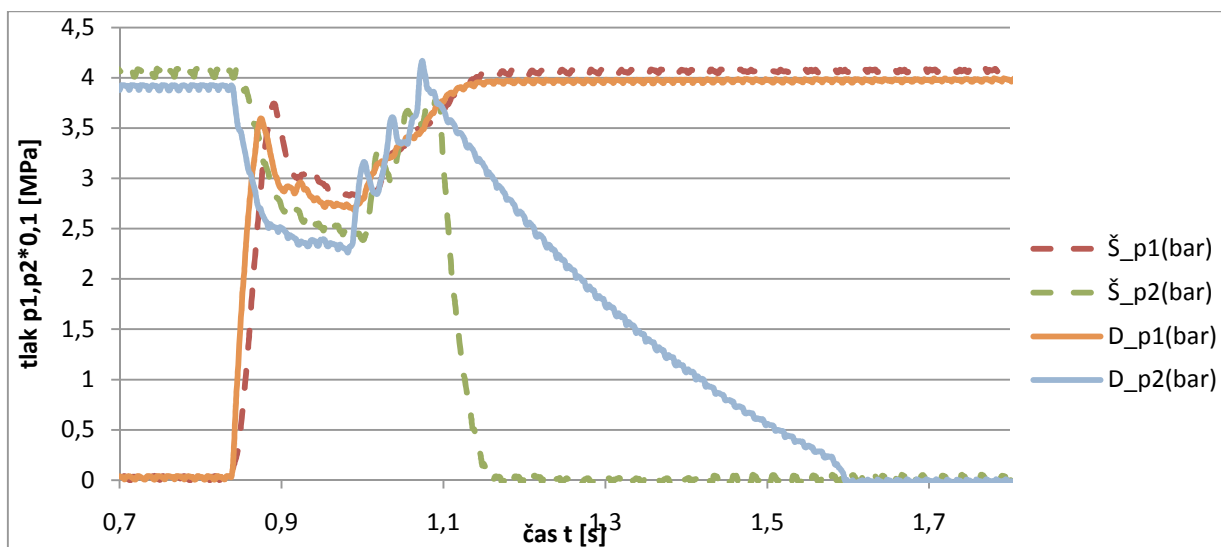


Graf 32 : porovnání rychlosti pístu při různém tlumení

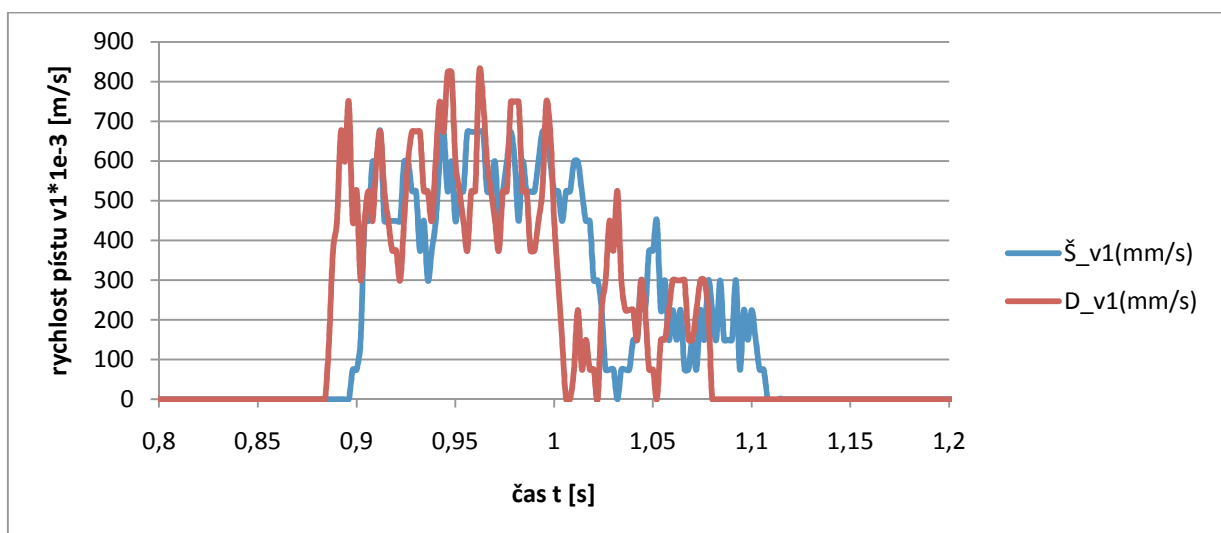


Graf 33 : porovnání polohy pístu při různém tlumení

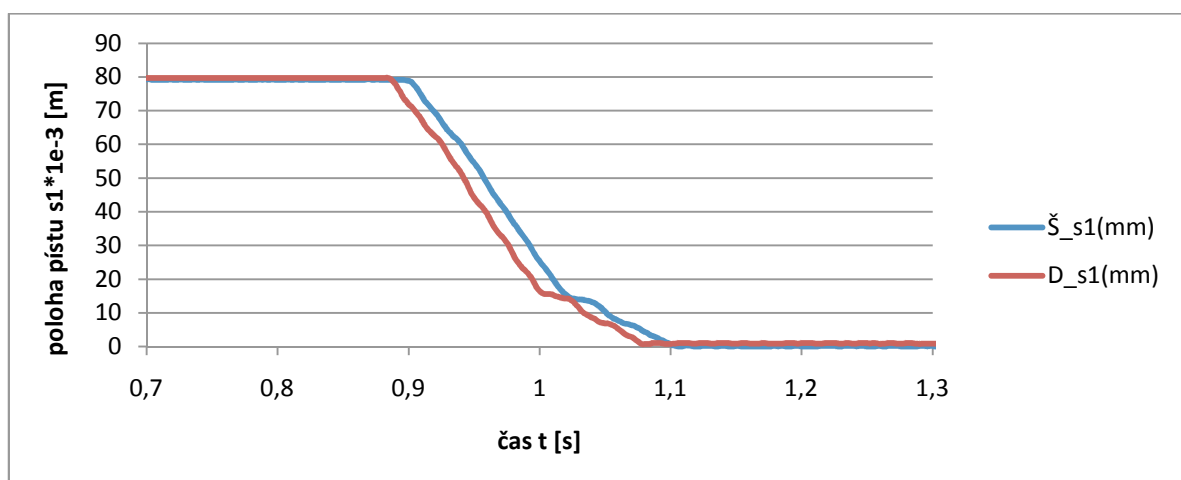
Porovnání tlumení škrtícím ventilem a drážkou při tlaku 0,4 MPa a zatížení 0 kg.



Graf 34 : porovnání tlaků před a za pístem při různém tlumení

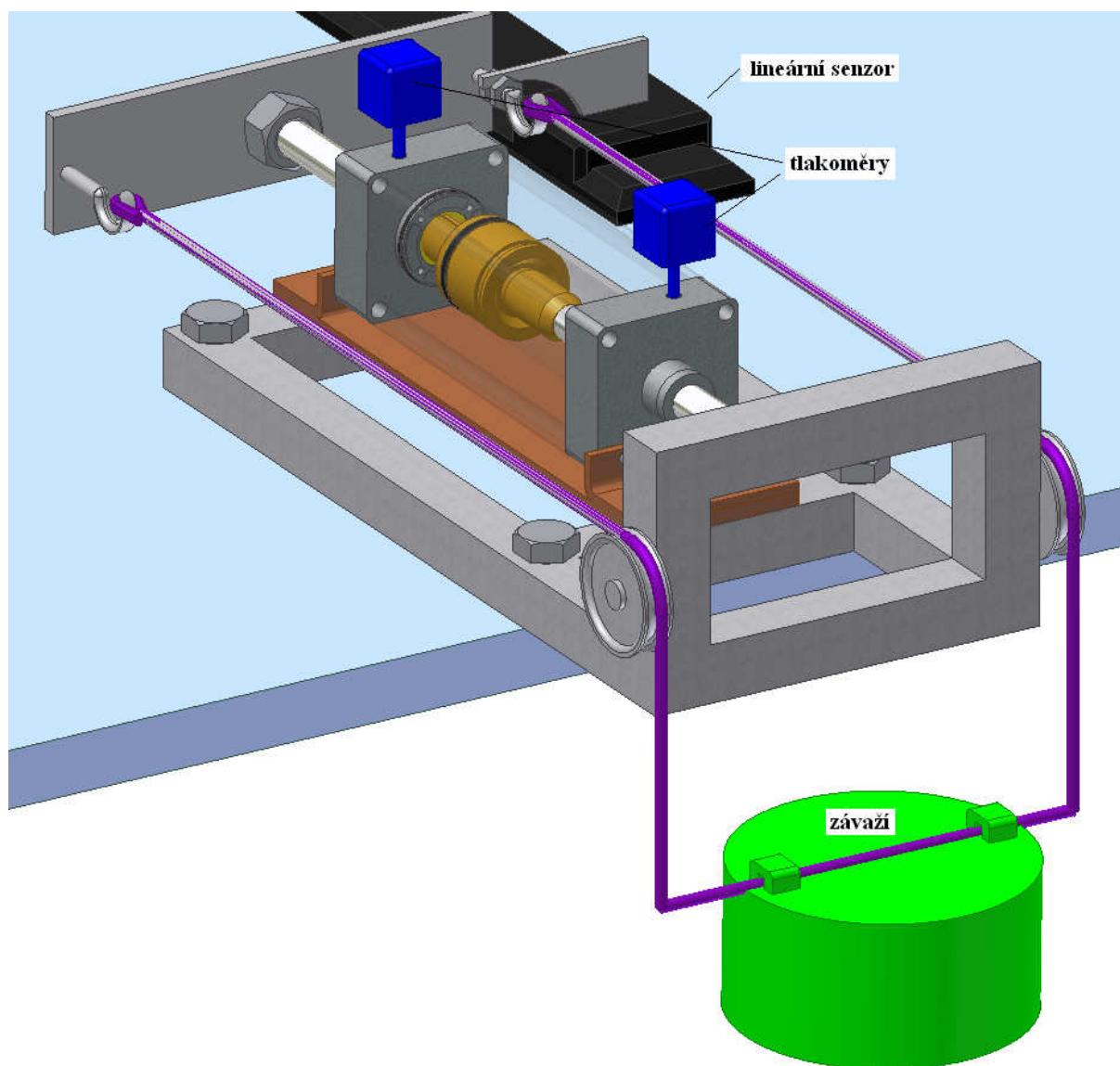


Graf 35 : porovnání rychlosti pístu při různém tlumení

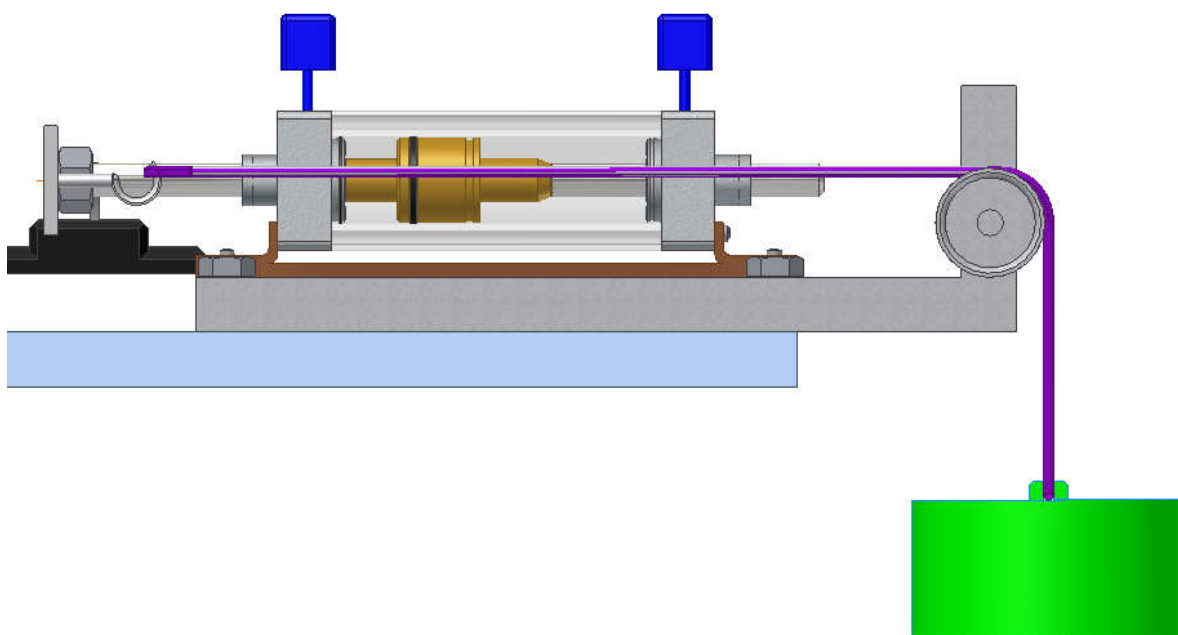


Graf 36 : porovnání polohy pístu při různém tlumení

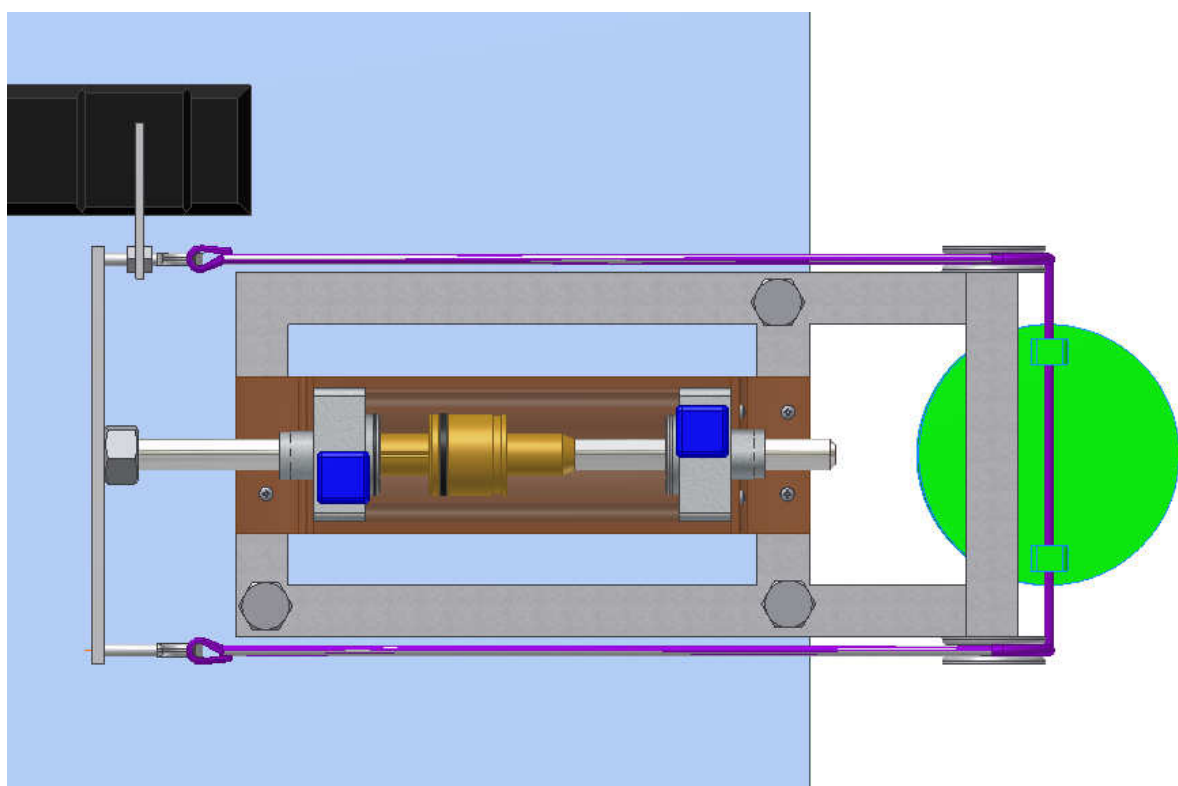
2. Zjednodušený 3D model experimentálního zařízení



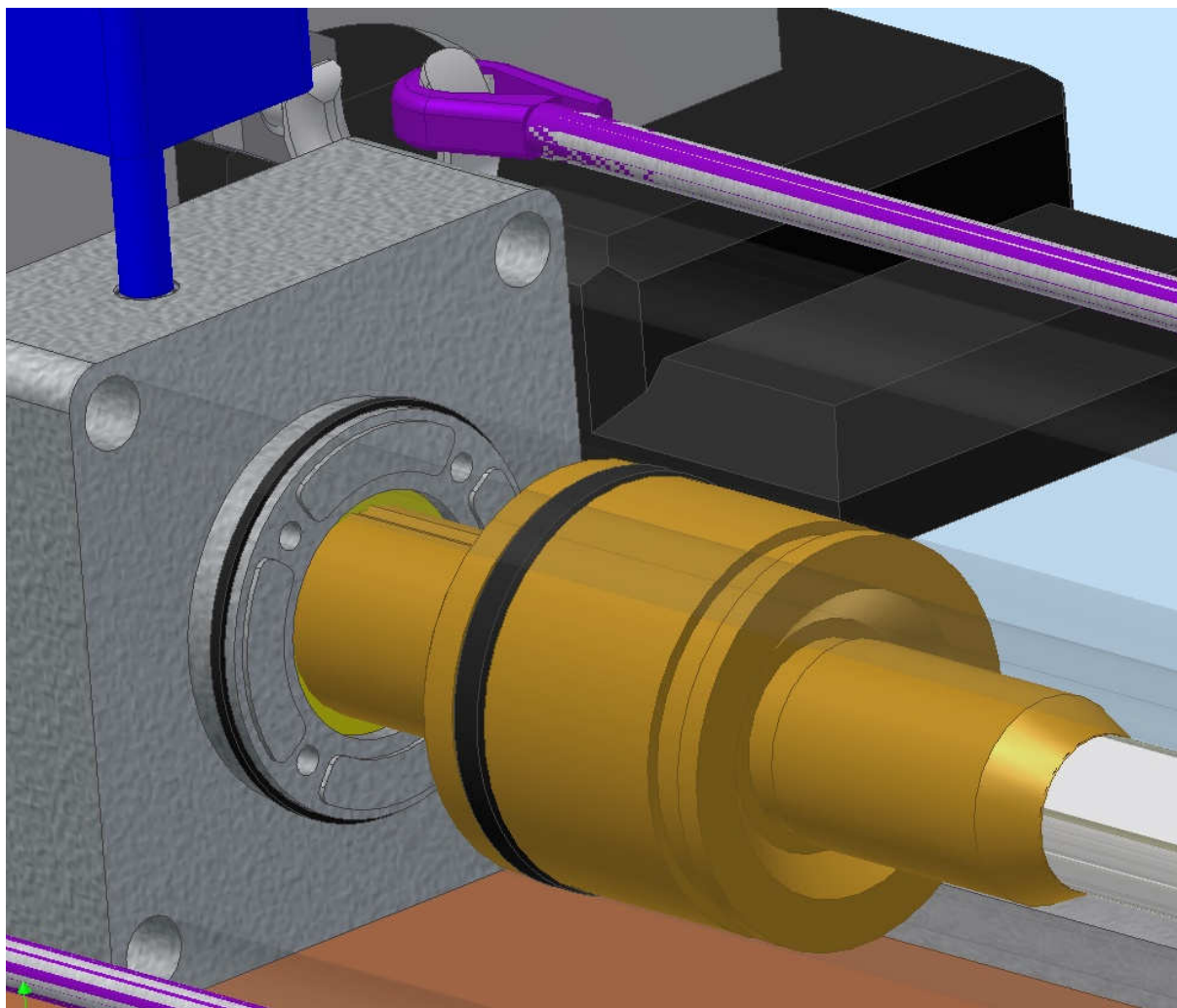
Obrázek 1 : pohled na 3D model



Obrázek 2 : boční pohled na 3D model

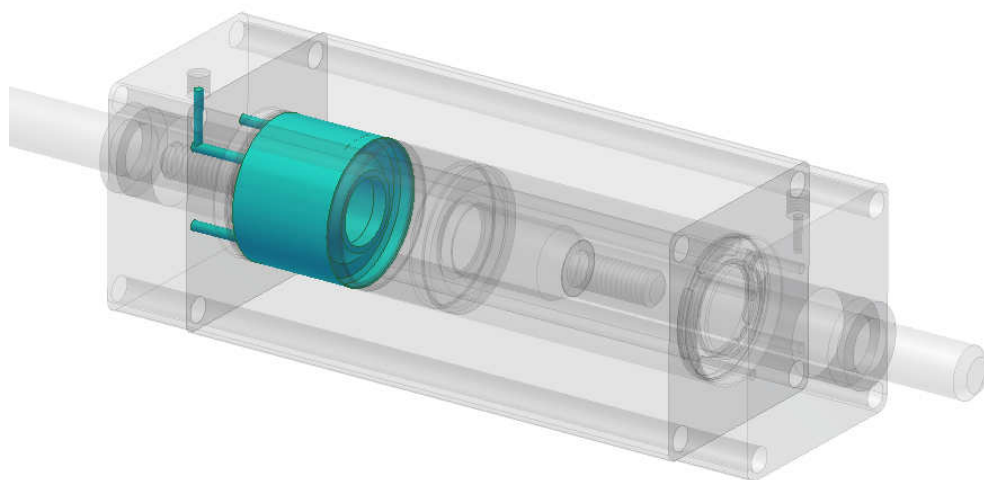


Obrázek 3 : horní pohled na 3S model



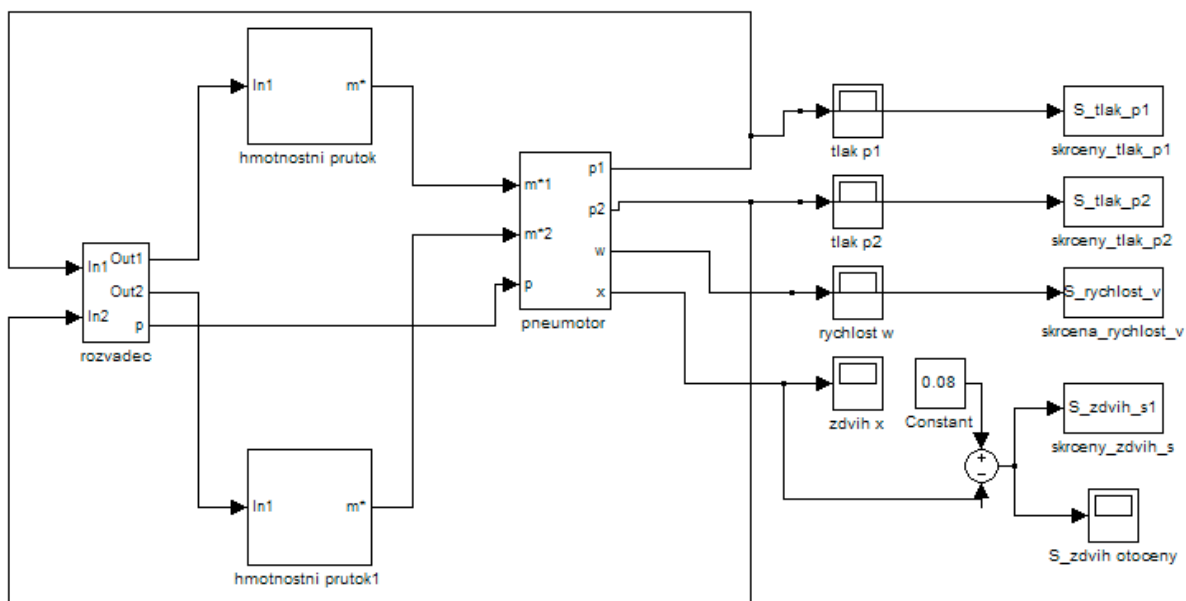
Obrázek 4 : detail pístu na začátku tlumení

Pomocí programu Inventor jsem si vypočetli škodlivý objem vzduchu, který jsem poté použili při tvorbě matematického modelu.



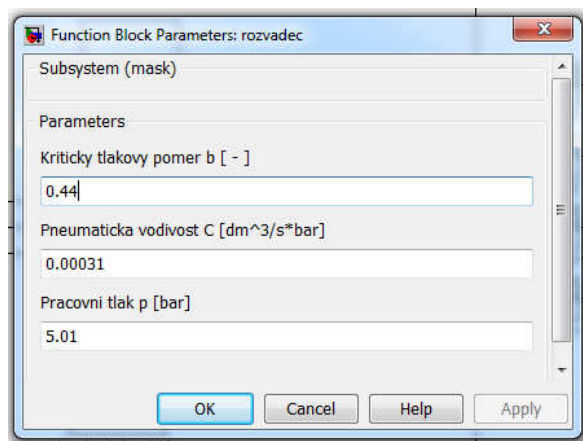
Obrázek 5 : Zobrazení objemu vzduchu na začátku tlumení

3. Tvorba matematického modelu pneumomotoru

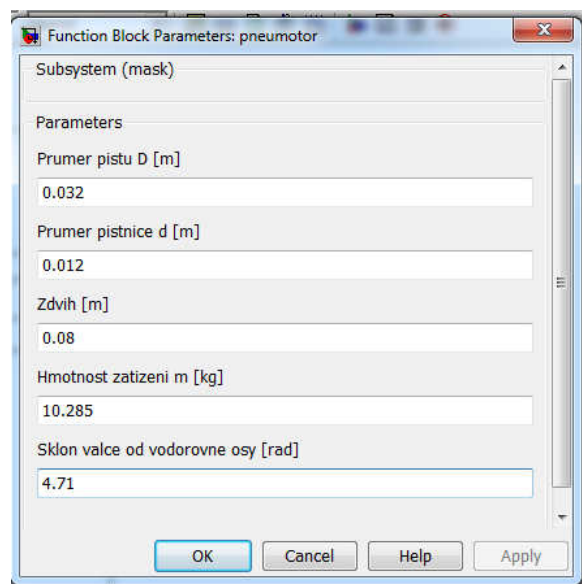


Obrázek 6 : model pneumomotoru

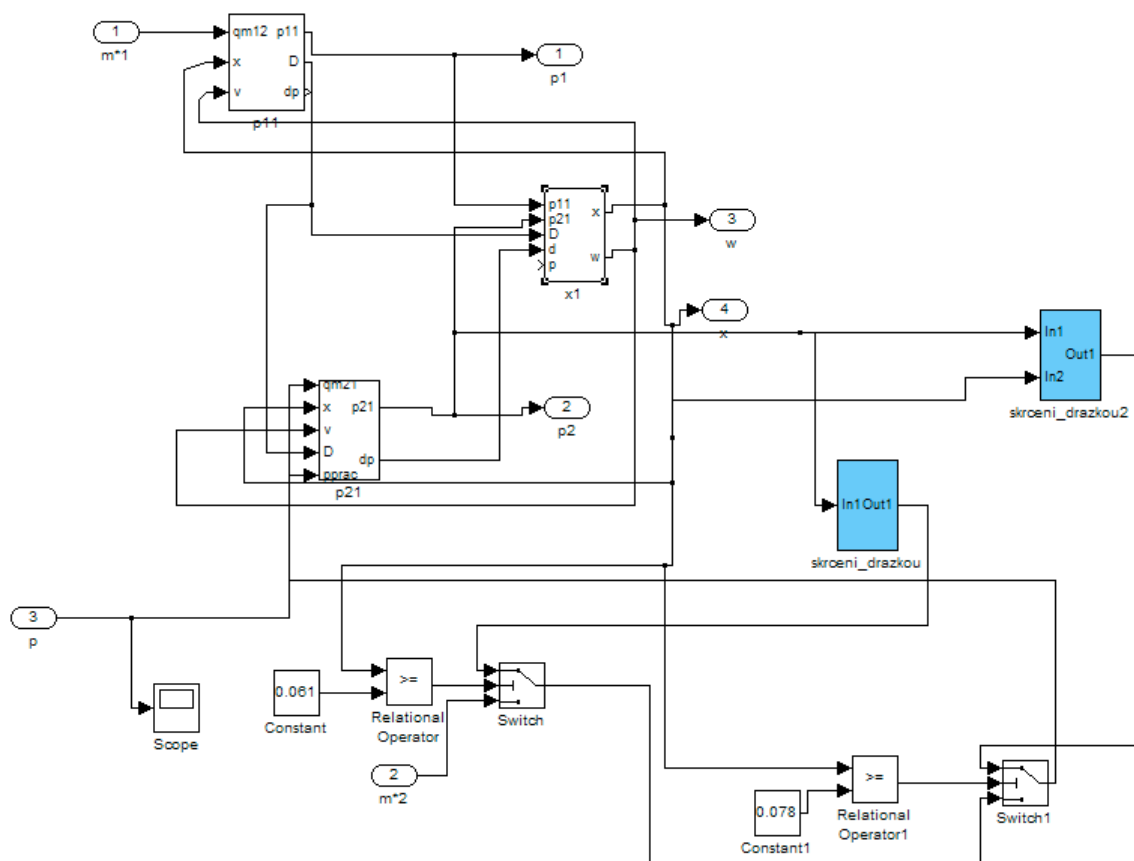
První tři bloky tvoří model rozvaděče, dále je pneumomotor, který jsem oproti klasickému modelu pneumomotoru upravili přidáním tlumení. Tyto úpravy jsou uvedeny níže.



Obrázek 7 : nastavení parametrů rozvaděče

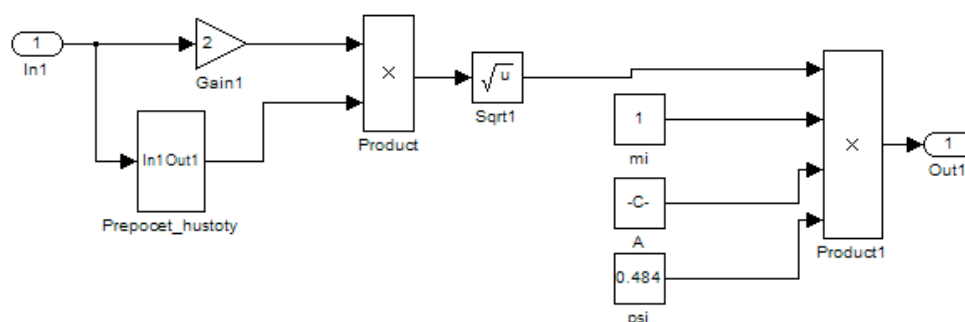


Obrázek 8 : nastavení parametrů pneumomotoru

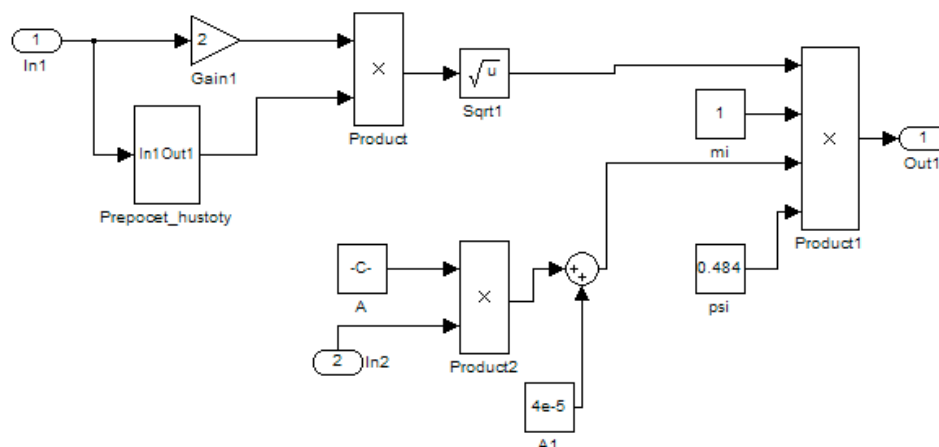


Obrázek 9 : matematický model pneumomotoru s přidáním tlumením pomocí drážky

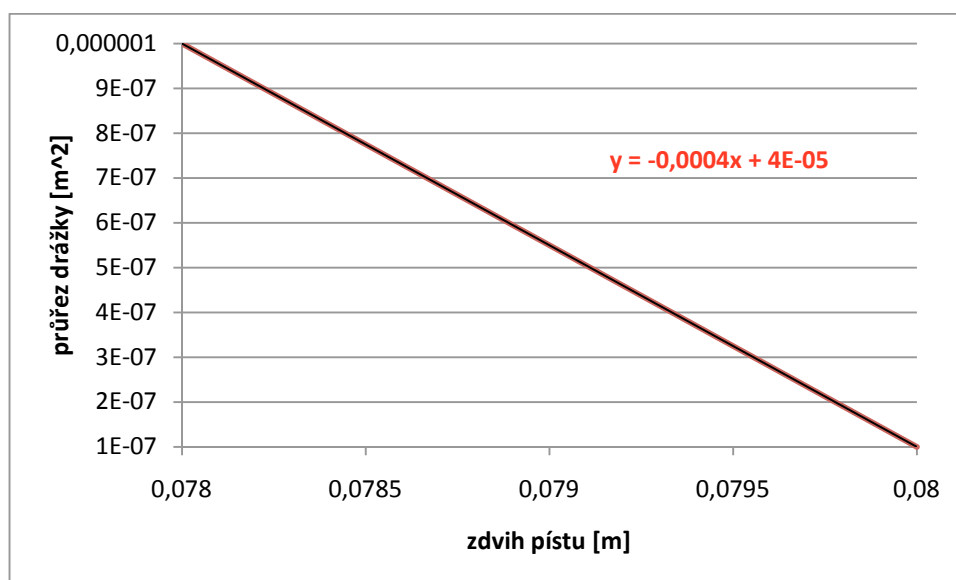
Na začátku zdvihu se průtok počítá pomocí modelu rozvaděče, až zdvih dosáhne hodnoty 61 mm přepne se výpočet a začne se počítat průtok modelem tlumení drážkou, tento model počítá až do chvíle než píst dojde na hodnotu zdvihu 78 mm, tedy do místa kde se drážka začíná zužovat. Průtok se začne počítat pomocí rovnice tlumení pomocí drážky která se lineárně zužuje.



Obrázek 10 : matematický model tlumení pomocí drážky konstantním průřezem



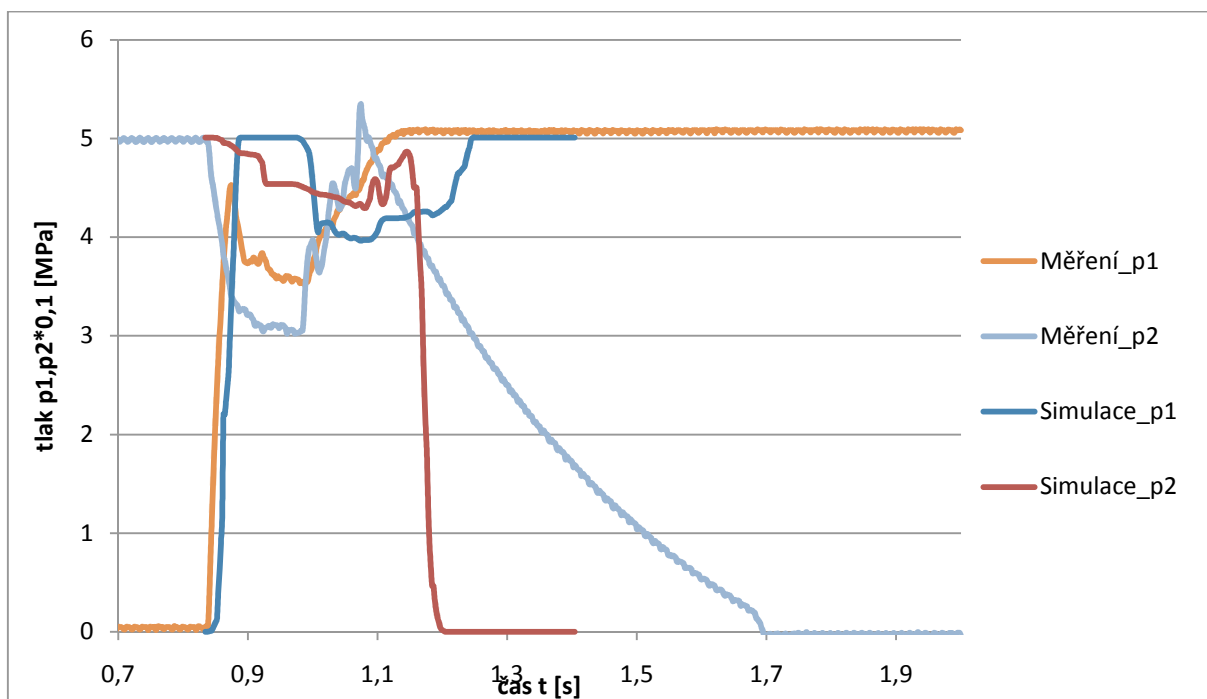
Obrázek 11 : matematický model tlumení drážkou s měnícím se průřezem



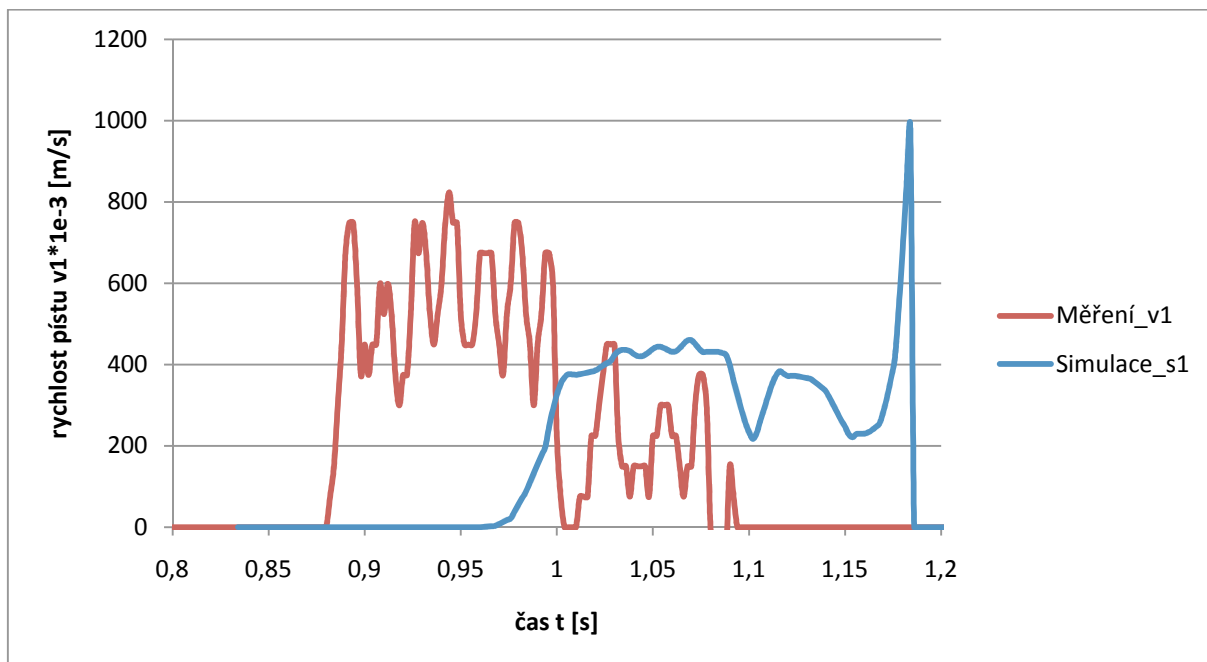
Graf 37 : stanovení rovnice pro zúžení drážky

4. Porovnání simulace a experimentálního měření tlumení dojezdu pístu do koncové polohy

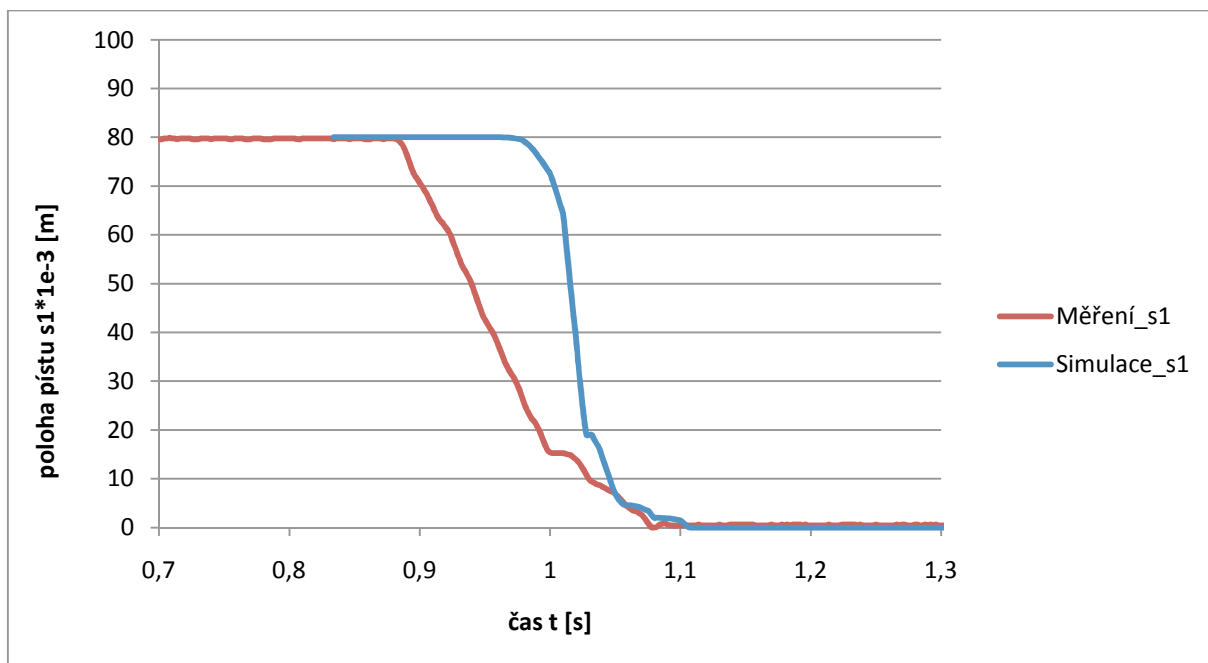
Porovnání tlumení při tlaku 0,5 MPa a zatížení 0 kg.



Graf 38 : porovnání tlaku před a za pístem

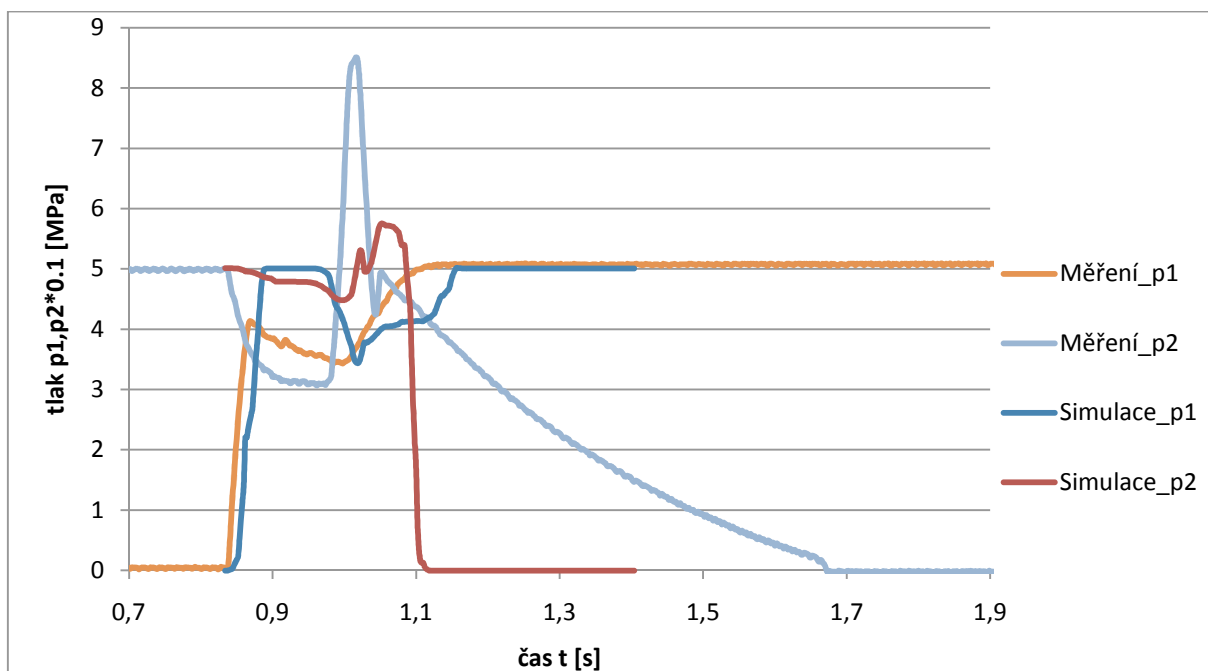


Graf 39 : porovnání rychlosti pístu

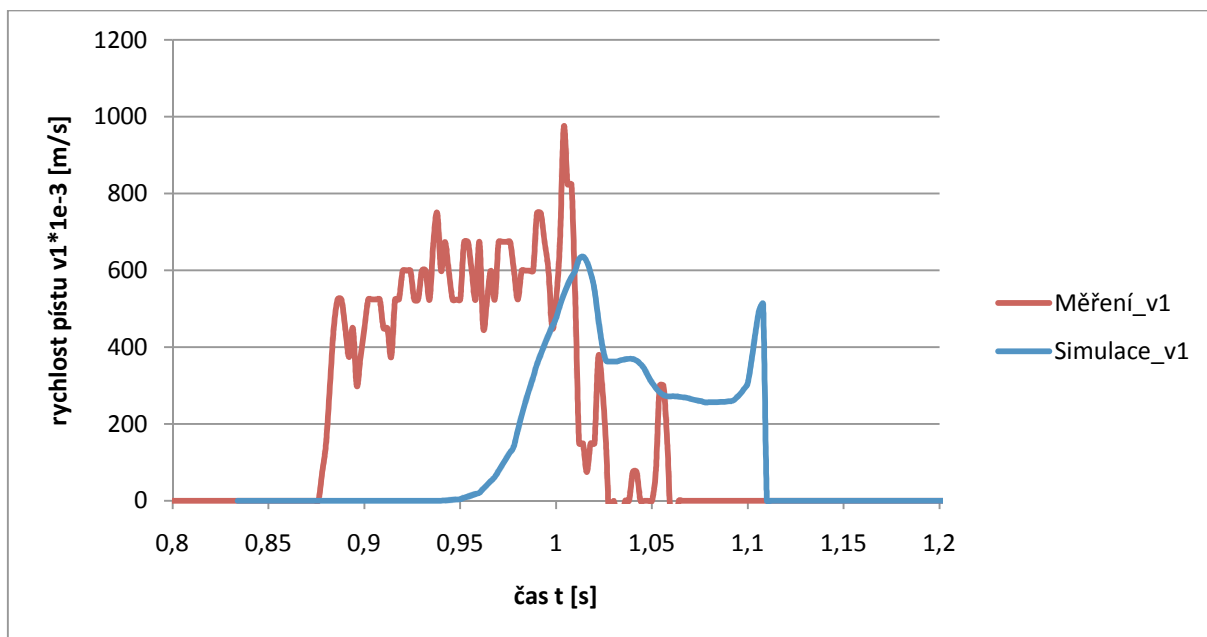


Graf 40 : porovnání polohy pístu

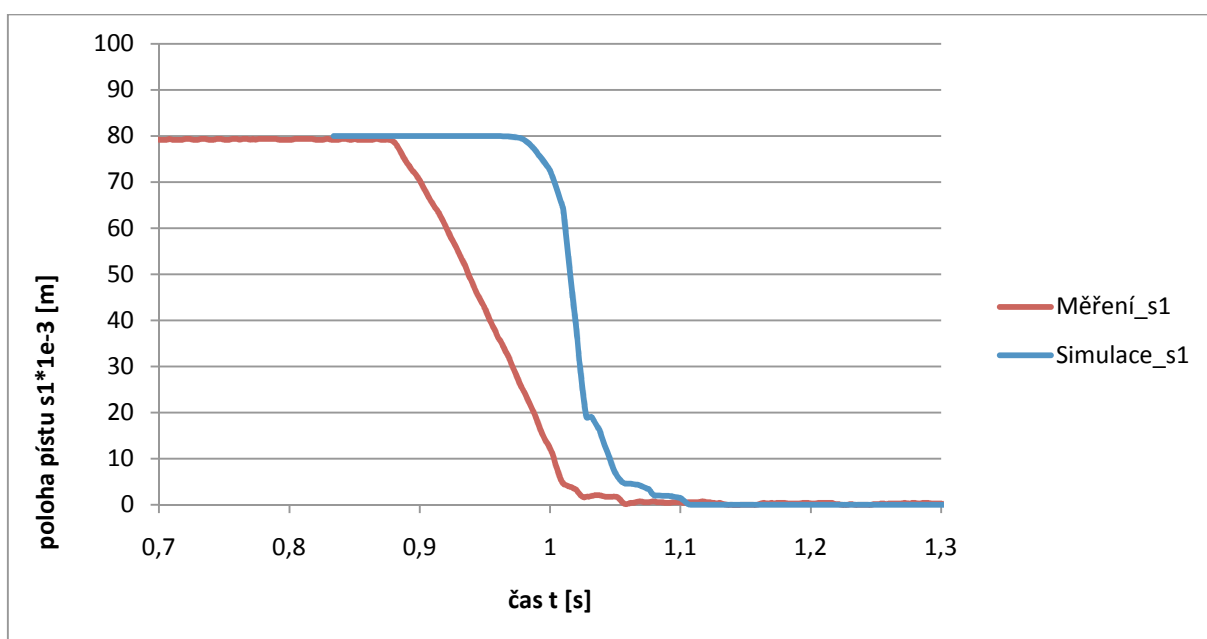
Porovnání tlumení při tlaku 0,5 MPa a zatížení 6 kg.



Graf 41 : porovnání tlaku před a za pístem

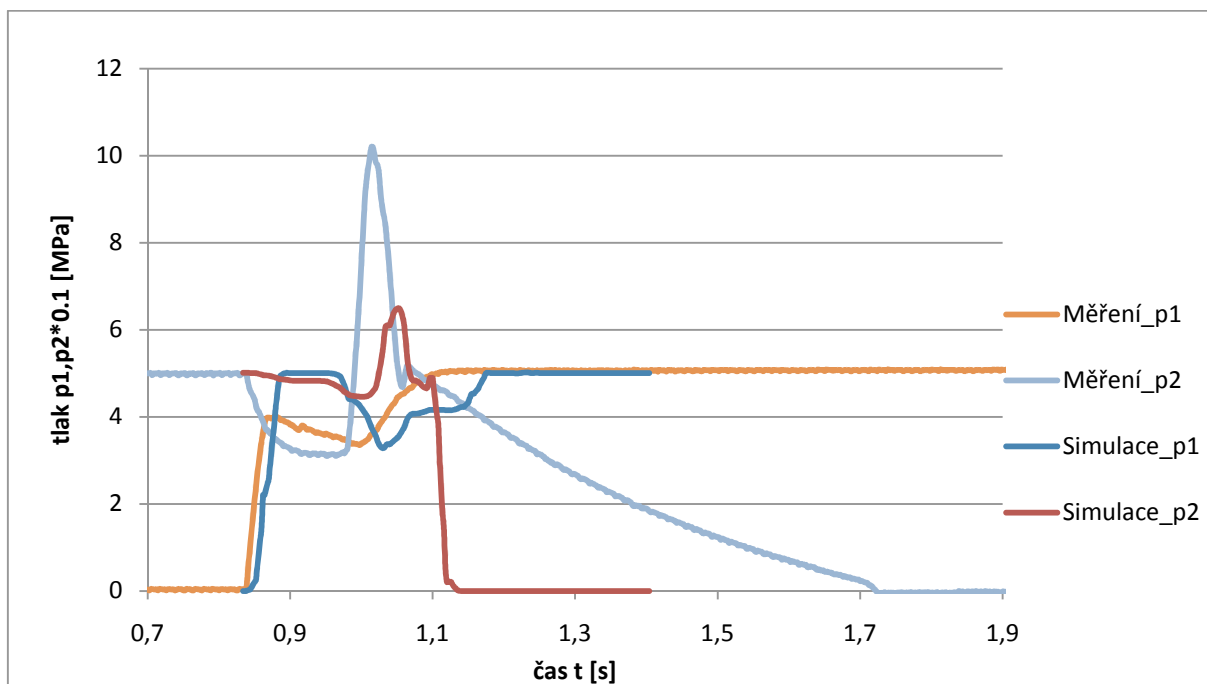


Graf 42 : porovnání rychlosti pístu

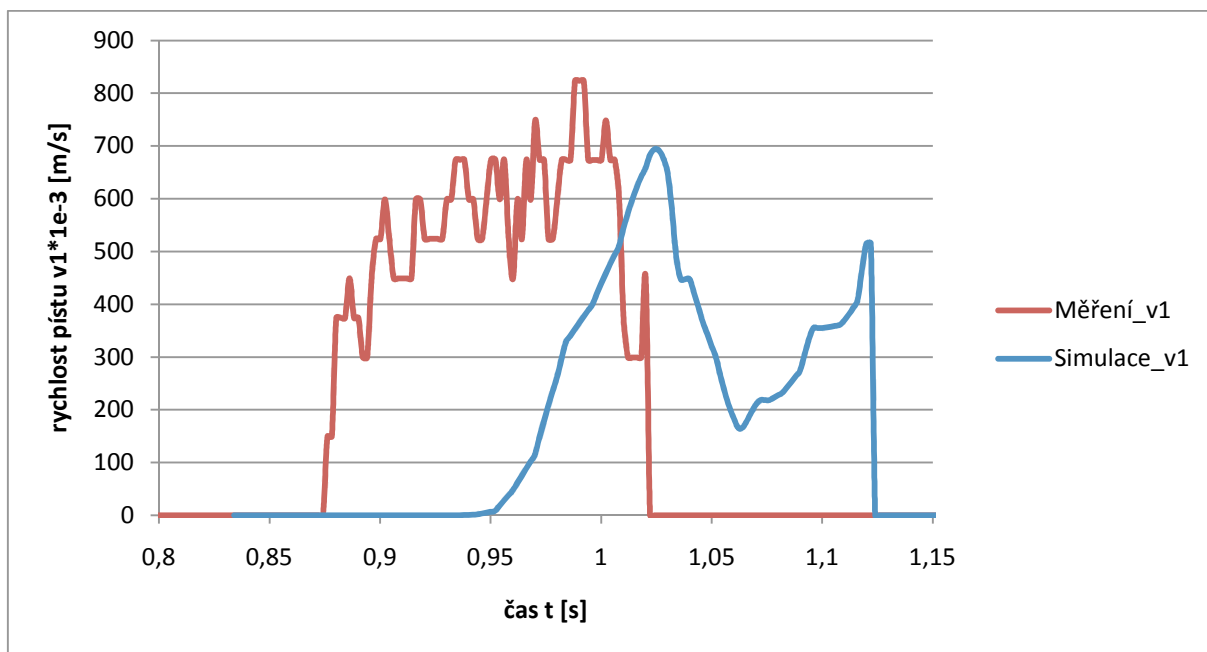


Graf 43 : porovnání polohy pístu

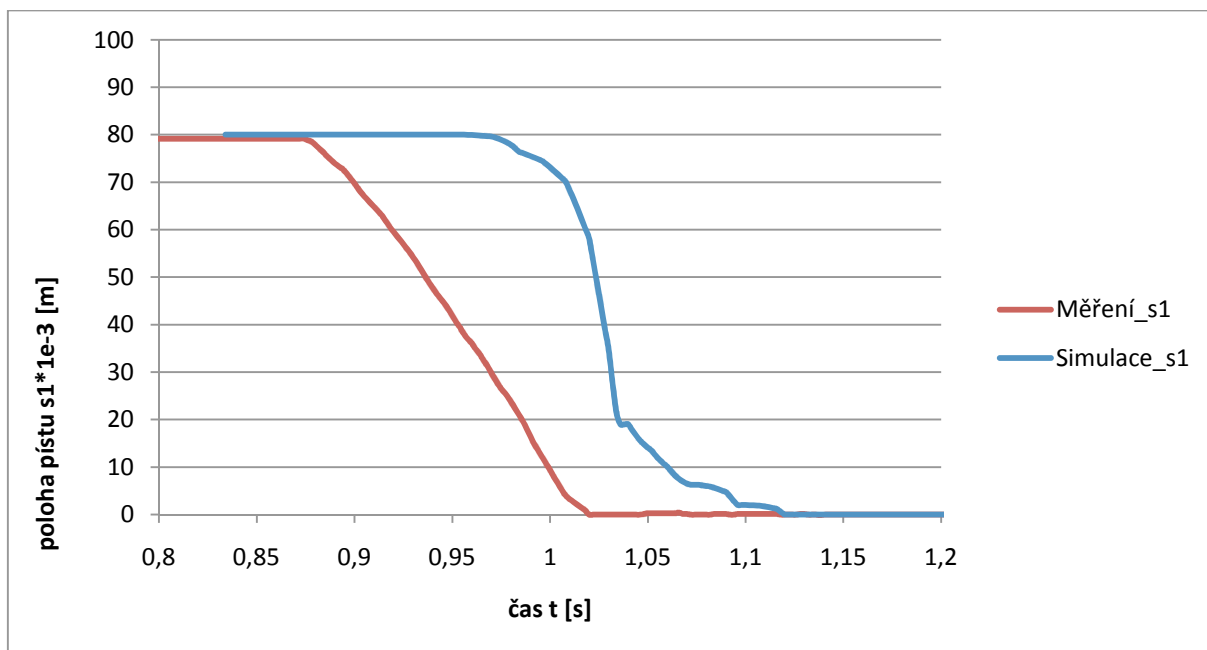
Porovnání tlumení při tlaku 0,5 MPa a zatížení 8,855 kg.



Graf 44 : porovnání tlaku před a za pístem

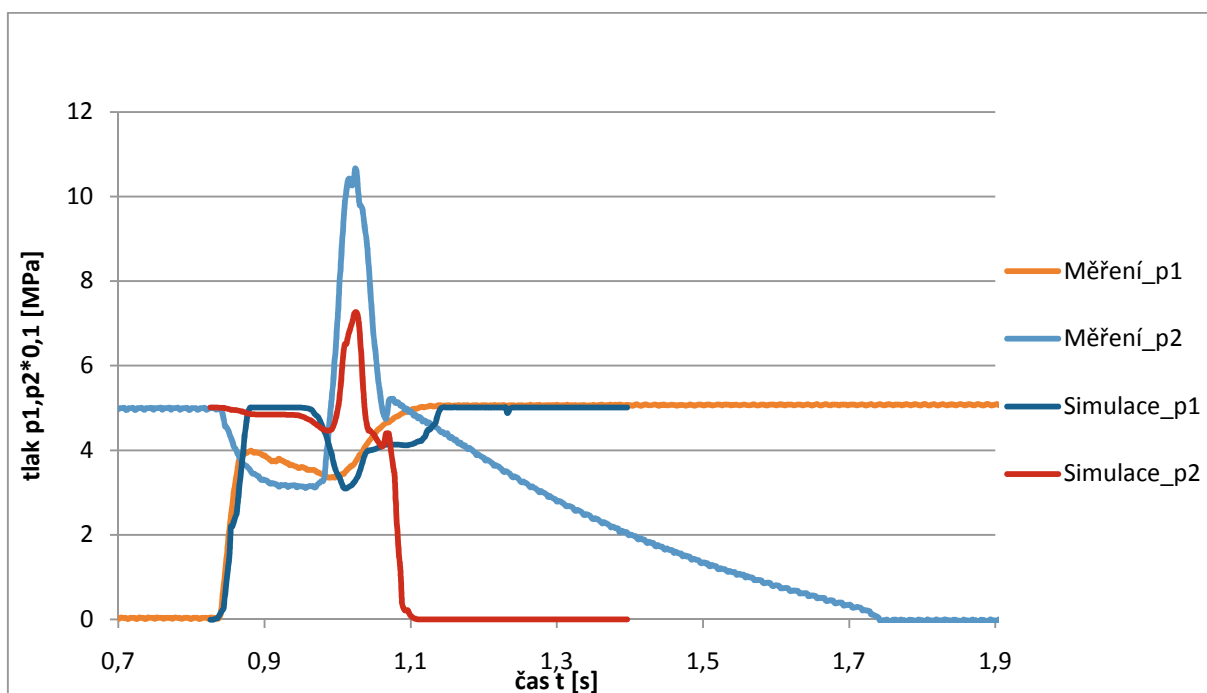


Graf 45 : porovnání rychlosti pístu

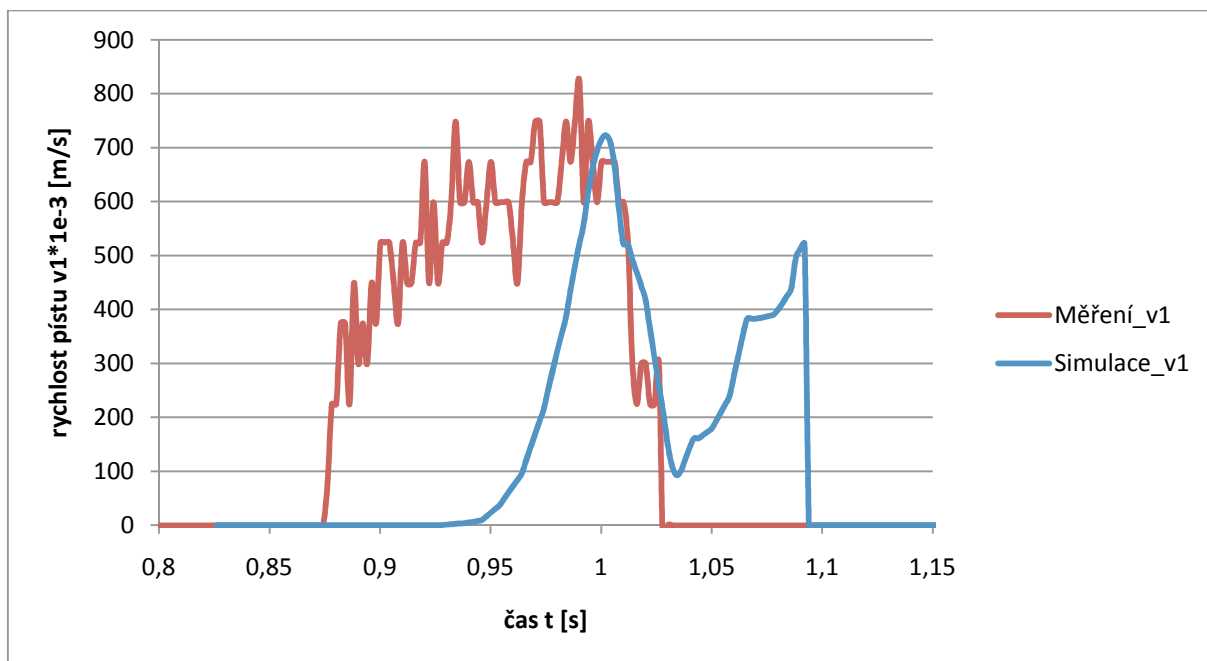


Graf 46 : porovnání polohy pístu

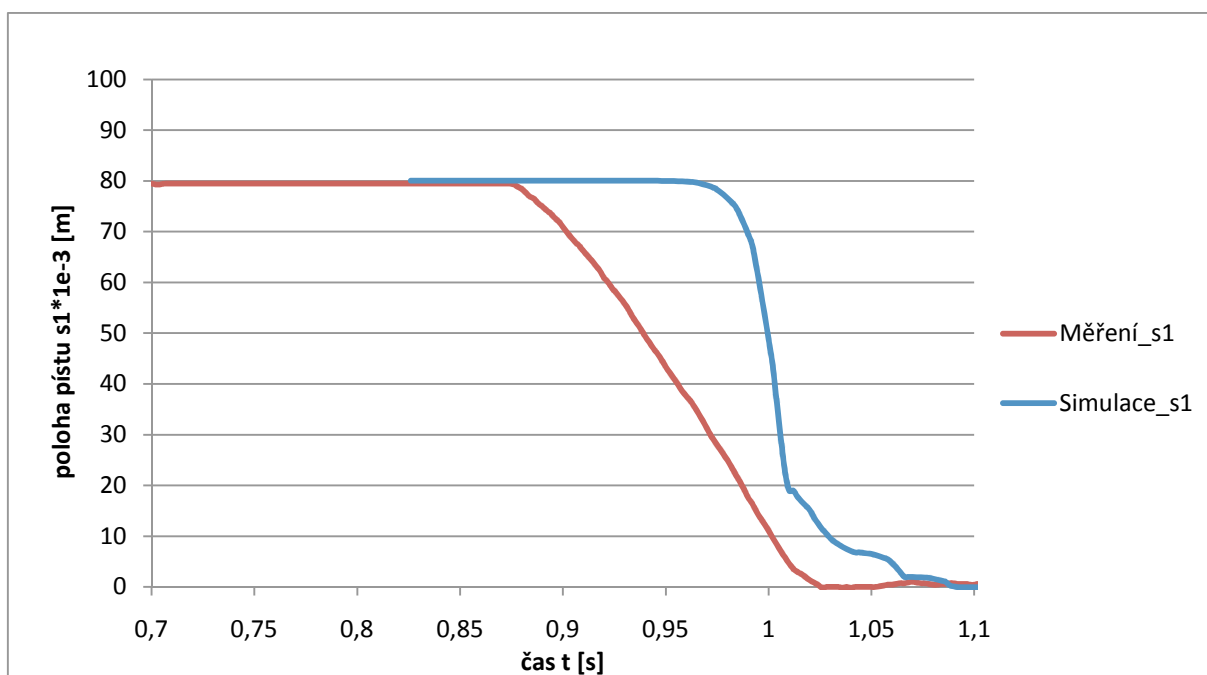
Porovnání tlumení při tlaku 0,5 MPa a zatížení 10,285 kg.



Graf 47 : porovnání tlaku před a za pístem



Graf 48 : porovnání rychlosti pístu



Graf 49 : porovnání polohy pístu



Obrázek 12 : nastavení škrcení

25